

CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

**ESTABILIZAÇÃO DIMENSIONAL POR MEIO DO TRATAMENTO
TÉRMICO E SEUS EFEITOS SOBRE AS PROPRIEDADES DE
PAINÉIS DE PARTÍCULAS ORIENTADAS (OSB)**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Tomaselli

CURITIBA

2004

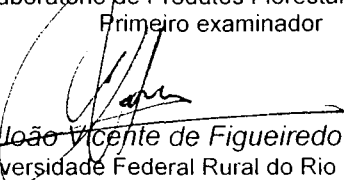
PARECER

Defesa nº. 560

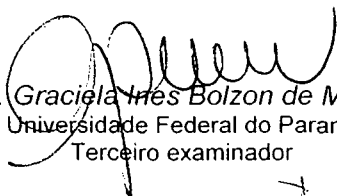
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Cláudio Henrique Soares Del Menezzi* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.



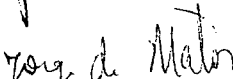
Dr. Divino Eterno Teixeira
Laboratório de Produtos Florestais/IBAMA
Primeiro examinador



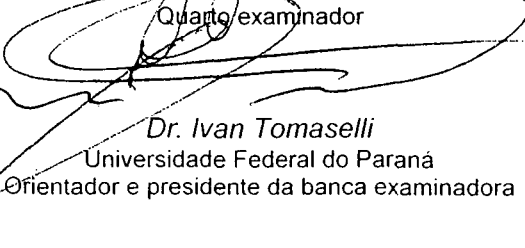
Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Segundo examinador



Dr. Graciela Inês Bolzon de Muniz
Universidade Federal do Paraná
Terceiro examinador



Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador



Dr. Ivan Tomaselli
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 28 de maio de 2004.



Graciela Inês Bolzon de Muniz
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Carlos Roberto Sanquetta
Vice-Coordenador do Curso

*Dedico a todos que trabalham e se esforçam
para alcançar seus objetivos, mesmo os mais
inatingíveis, e para quebrar paradigmas,
mesmo os mais arraigados*

“Eles fizeram porque não sabiam que era impossível”
*Sobre os grandes avanços da Ciência e da Tecnologia
(Livro Verde da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2001)*

AGRADECIMENTOS

- ❑ A Deus que me deu forças para alcançar este objetivo;
- ❑ Aos meus pais, Carlos e Marise, aos meus irmãos, Cristiane e Leonardo, pelo estímulo e pela torcida entusiasmada, e a todos os familiares que me deram um grande apoio, especialmente meus tios Victor e Mirtes;
- ❑ À minha esposa e companheira, Sílvia Maria, co-responsável pelo meu engrandecimento intelectual e profissional;
- ❑ Ao orientador, Prof. Ivan Tomaselli, cuja visão progressista na aplicação do conhecimento científico muito me estimulou na execução deste trabalho;
- ❑ Aos professores Setsuo Iwakiri, Sidon Keinert Jr. e Jorge Luis Monteiro de Matos pelas sugestões dadas;
- ❑ Ao Governo do Brasil, pela possibilidade de me proporcionar educação de qualidade e gratuita desde a graduação até aqui;
- ❑ Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos sem a qual não seria possível a realização deste trabalho, nem de inúmeros outros, desde o período da graduação;
- ❑ Ao CNPq, enquanto local de trabalho, especialmente na pessoa da Dra. Maria Auxiliadora da Silveira, Coordenadora Técnica do Programa de Pesquisa em Agropecuária e Agronegócios, e demais colegas pelo grande apoio dado;
- ❑ À Masisa do Brasil, pela concessão do material utilizado no trabalho;
- ❑ Aos inumeráveis amigos que me acompanham desde os idos tempos da Universidade de Brasília, posteriormente na Universidade de São Paulo e atualmente na Universidade Federal do Paraná, pelo companherismo e lealdade na amizade;
- ❑ Ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal da UFPR, pelas excelentes condições para execução deste trabalho, bem como pela possibilidade de completar meus estudos em um dos centros mais avançados da Ciência e Tecnologia Florestal do mundo;
- ❑ Aos colegas e pesquisadores do Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA, especialmente Divino Eterno Teixeira, Esmeralda Yoshiko, Marcos Santana, Mário Rabelo de Souza e José Arlete, pelo auxílio nas discussões dos resultados;
- ❑ Aos inúmeros colegas da lista eletrônica de discussão *Wood Science* (University of British Columbia, Canadá) pela troca de idéias que muito me inspiraram, e em especial para aqueles da Alemanha, Austrália, Canadá, Coréia do Sul, EUA, Finlândia, França, Holanda e Iugoslávia, pelo envio de importantes artigos científicos;
- ❑ Aos funcionários e acadêmicos dos cursos de Engenharia Florestal e Engenharia Industrial Madeireira, Ademir, Antônio, Daniel, Dayane, Prata, Vitor, pelo apoio na execução do trabalho;
- ❑ Aos amigos que, sempre interessados, perguntavam: “Cláudio, e a tese?”.

BIOGRAFIA

CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI, filho de Carlos Alberto Del Menezzi e de Marise Marília Soares Del Menezzi, nasceu em Belo Horizonte (MG) em 04 de março de 1970.

Iniciou seus estudos em 1977 na 1ª série do 1º grau no Colégio Estadual Pandiá Calógeras, em Belo Horizonte. Em 1978, mudou-se com a família para Brasília (DF), onde conclui o 1º grau no Colégio Marista. Transferiu-se para o Centro Educacional Objetivo onde conclui o 2º grau em 1988.

Em março de 1990 ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, graduando-se em 1995, após cumprir créditos e apresentar a monografia “Fabricação e avaliação tecnológica da chapa aglomerada com madeira de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus urophylla*”.

Em março de 1996 iniciou seus estudos em nível de mestrado na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, obtendo em 1999 o título de mestre em Ciência e Tecnologia de Madeiras após defesa da dissertação “Utilização de um método combinado de desdobro e secagem para a produção de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *E. cloeziana*”.

Em março de 1998 foi contratado como professor substituto responsável pela disciplina Estruturas de Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. Lecionou também Painéis de Madeira e Secagem e Preservação de Madeira até fevereiro de 2000.

Em março de 2000 afastou-se da Universidade de Brasília e ingressou no curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, em nível de doutorado, na área de concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Em maio 2002 foi aprovado em concurso público para o cargo de Analista em Ciência e Tecnologia Pleno, no Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e em 15 de agosto tomou posse. Atualmente está lotado na Coordenação do Programa de Pesquisa em Agropecuária e Agronegócios, onde atua em programas de fomento ao desenvolvimento tecnológico.

Em março de 2004 retornou à atividade docente, na qualidade de professor substituto responsável pela disciplina Estruturas de Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. Na atividade acadêmica, além da docência, é membro do Comitê Editorial do periódico científico *Brasil Florestal* e participa como membro associado da Forest Products Society e Society of Wood Science and Technology (EUA), Japan Wood Research Society (Japão), Institute of Foresters of Australia (Austrália), Institute of Wood Science (Inglaterra) e International Union of Forest Research Organizations (Áustria).

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	X
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	XII
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1 INSTABILIDADE DIMENSIONAL DA MADEIRA E DE SEUS SUBPRODUTOS	6
2.1.1 Conceitos Básicos e Origem da Instabilidade da Madeira	6
2.1.2 Implicações no Uso	15
2.2 ESTABILIZAÇÃO DIMENSIONAL DA MADEIRA E DE SEUS SUBPRODUTOS	20
2.2.1 Tecnologia de Produto	21
2.2.2 Tratamento da Madeira	24
2.3 TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA E DE SEUS SUBPRODUTOS	39
2.3.1 Alterações nas Propriedades Físicas e Mecânicas	40
2.3.2 Alterações na Composição Química	57
2.3.3 Alterações na Resistência Biológica	63
2.3.4 Alterações de Outras Propriedades	67
2.3.5 Cinética da Degradação Térmica da Madeira	71
3 MATERIAIS E MÉTODOS	100
3.1 MATERIAL	100
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO	100
3.3 DEFINIÇÃO DE TEMPO E TEMPERATURA	101
3.4 PROPRIEDADES DOS PAINÉIS	102
3.4.1 Obtenção dos Corpos-de-prova	102
3.4.2 Propriedades Físicas	103
3.4.3 Propriedades Mecânicas	105
3.4.4 Propriedades Colorimétricas	107
3.4.5 Propriedades Químicas	109
3.5 ANÁLISE DO EXPERIMENTO	110
3.5.1 Comparação com as Propriedades dos Painéis Não-Tratados	111
3.5.2 Efeito da Temperatura e do Tempo de Tratamento	112
3.5.3 Determinação dos Parâmetros Cinéticos da Degradação Térmica	113
3.5.4 Comparação com Painéis Compensados	114
3.6 ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DO TRATAMENTO	114
3.6.1 Análise de Viabilidade Operacional	114
3.6.2 Análise de Viabilidade Econômica	115
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	122
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS	122
4.2 EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS	122
4.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO	126
4.3.1 Efeito nas Propriedades Físicas	126
4.3.2 Efeito nas Propriedades Mecânicas	140
4.3.3 Efeito nas Propriedades Colorimétricas	151
4.3.4 Efeito nas Propriedades Químicas	160
4.3.5 Parâmetros Cinéticos da Degradação Térmica	169
4.3.6 Escolha da Temperatura e do Tempo de Tratamento Térmico	175

4.4 COMPARAÇÃO COM PAINÉIS COMPENSADOS.....	177
4.5 ASPECTOS OPERACIONAIS E ECONÔMICOS DO TRATAMENTO.	180
4.5.1 Operacionalização do Tratamento	180
4.5.2. Análise Econômica.....	186
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	190
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGLOMERADO DE BAGAÇO DE CANA MODIFICADO QUIMICAMENTE POR ACETILAÇÃO.	34
TABELA 2 - EFEITO DA TEMPERATURA DE SECAGEM NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE NORWAY SPRUCE.	44
TABELA 3 - PROPRIEDADES DE PAINÉIS FABRICADOS COM PARTÍCULAS PRÉ-VAPORIZADAS.	50
TABELA 4 - INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS AGLOMERADOS VAPORIZADOS.	52
TABELA 5 - INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS TRATADOS TERMICAMENTE.	53
TABELA 6 - EFEITO DA Prensagem sobre a estabilidade dimensional de painéis FLAKEBOARD.	56
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE PARTÍCULAS DE MADEIRA VAPORIZADAS.	59
TABELA 8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PERDA DE MASSA DA MADEIRA DE <i>PINUS SYLVESTRIS</i> VAPORIZADA.	60
TABELA 9 - ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA MADEIRA DE <i>PINUS</i> TRATADA TERMICAMENTE. ...	60
TABELA 10 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE PAINÉIS FLAKEBOARD TRATADOS TERMICAMENTE.	63
TABELA 11 - EFEITO DA TEMPERATURA E TEMPO DE TRATAMENTO NA MELHORIA DA RESISTÊNCIA AO APODRECIMENTO.	66
TABELA 12 - PERDA DE MASSA (%) PARA MADEIRAS TRATADAS E NÃO-TRATADAS NO ENSAIO COM FUNGOS DE PODRIDÃO MOLE E BACTÉRIAS.	66
TABELA 13 - PERDA DE MASSA (%) PARA MADEIRAS TRATADAS E NÃO-TRATADAS SEGUNDO O FUNGO APODRECEDOR.	67
TABELA 14 - RELAÇÃO ENTRE A CLARIDADE (L*) E CONSTITUINTES QUÍMICOS DE MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.	69
TABELA 15 - TAXA CONSTANTE (K) PARA ALGUMAS PROPRIEDADES.	74
TABELA 16 - MÓDULO DE RUPTURA RESIDUAL (%) DA MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.	77
TABELA 17 - PARÂMETROS DO MODELO DA EQUAÇÃO 6 PARA O MÓDULO DE RUPTURA RESIDUAL DE MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.	78
TABELA 18 - TEMPO ESTIMADO (ANOS) PARA MOR RESIDUAL.	81
TABELA 19 - ENERGIA DE ATIVAÇÃO (ΔH) PARA A DEGRADAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES.	84
TABELA 20 - ENERGIA DE ATIVAÇÃO (ΔH) PARA A DEGRADAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES.	85
TABELA 21 - DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO PARA COMPARAÇÃO COM OS PAINÉIS NÃO-TRATADOS (TESTEMUNHA).	111
TABELA 22 - PERFORMANCE FÍSICA E MECÂNICA MÍNIMA EXIGIDA DE PAINÉIS OSB SEGUNDO A NORMA CSA 0437.0.	112
TABELA 23 - DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE TRATAMENTO TÉRMICO.	112
TABELA 24 - VARIÁVEIS EMPREGADAS NA ANÁLISE FINANCEIRA.	121
TABELA 25 - CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS OSB ANTES DO TRATAMENTO.	122
TABELA 26 - PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL E PERDA DE MASSA DOS PAINÉIS OSB.	126
TABELA 27 - EFICIÊNCIA (%) DO TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS PAINÉIS OSB.	127
TABELA 28 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.	136
TABELA 29 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.	138
TABELA 30 - VALORES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS.	140
TABELA 31 - EFICIÊNCIA (%) DO TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS OSB.	141
TABELA 32 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS OSB TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.	147
TABELA 33 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS OSB TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.	149

TABELA 34 - CLASSIFICAÇÃO DOS PAINÉIS DE ACORDO COM A NORMA CSA 0437.0.....	151
TABELA 35 - MÉDIA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS.	151
TABELA 36 - PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.....	155
TABELA 37 - PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.....	157
TABELA 38 - MÉDIA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS COMPONENTES QUÍMICOS.....	161
TABELA 39 - COMPONENTES QUÍMICOS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.....	164
TABELA 40 - COMPONENTES QUÍMICOS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.....	165
TABELA 41 - CORRELAÇÕES DE PEARSON (R) ENTRE OS COMPONENTES QUÍMICOS E AS PROPRIEDADES AFETADAS PELO TRATAMENTO.....	168
TABELA 42 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) E ENERGIA DE ATIVAÇÃO (ΔH) PARA AS PROPRIEDADES AFETADAS PELO TEMPO DE TRATAMENTO.....	174
TABELA 43 - EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES.....	175
TABELA 44 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL ENTRE OS PAINÉIS OSB E O COMPENSADO.....	178
TABELA 45 - INCHAMENTO EM ESPESSURA E ABSORÇÃO DE ÁGUA EM 24 HORAS OBSERVADO NA LITERATURA.....	180
TABELA 46 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TÁTICAS ANALISADAS.....	183
TABELA 47 - EQUIPAMENTOS REQUERIDOS PARA OS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.....	184
TABELA 48 - CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL DOS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.....	185
TABELA 49 - FLUXO DE CAIXA PARA OS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.....	186
TABELA 50 - VARIÁVEIS ECONÔMICAS DOS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.....	187
TABELA 51 - VARIÁVEIS ECONÔMICAS EM FUNÇÃO DO PRÊMIO OBTIDO PELO PAINEL TRATADO.....	188
TABELA 52 - VALORES (R\$/M ³) PARA OS DIVERSOS ITENS DO CUSTO TOTAL DE CADA TRATAMENTO RECOMENDADO.....	189

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ISOTERMAS DE SORÇÃO DA MADEIRA.....	8
FIGURA 2 - ISOTERMAS DE SORÇÃO DE PAINÉIS OSB.....	9
FIGURA 3 - ESTIMATIVA DE CONTRAÇÃO EM FUNÇÃO DA PERDA DE ÁGUA.....	11
FIGURA 4 - ESQUEMA DA PAREDE CELULAR DAS FIBRAS.....	12
FIGURA 5 - INFLUÊNCIA DA HISTERESE NA MOVIMENTAÇÃO DIMENSIONAL.....	17
FIGURA 6 - MECANISMO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS.....	18
FIGURA 7 - PRINCÍPIO DE LAMINAÇÃO CRUZADA EMPREGADO NA PRODUÇÃO DO COMPENSADO.....	21
FIGURA 8 - CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DO SAL UTILIZADO.....	26
FIGURA 9 - CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DO PESO MOLECULAR DO PEG.....	27
FIGURA 10 - PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO COMPOSITO MADEIRA-POLÍMERO.....	32
FIGURA 11 - REDUÇÃO DO INCHAMENTO E CONTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO GRAU DE ACETILAÇÃO.....	34
FIGURA 12 - REAÇÃO DE UM ANIDRIDO COM A MADEIRA.....	36
FIGURA 13 - EFEITO DOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO SOBRE O INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS AGLOMERADOS.....	37
FIGURA 14 - EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO SOBRE A ESTABILIDADE DIMENSIONAL.....	42
FIGURA 15 - PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DO SISTEMA CIE L*A*B.....	68
FIGURA 16 - PERDA DE MASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO.....	75
FIGURA 17 - RELAÇÃO NÃO-LINEAR PARA O MÓDULO DE RUPTURA RESIDUAL DE MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.....	79
FIGURA 18 - GRAU DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE DISTINTAS PROPRIEDADES DA MADEIRA.....	79
FIGURA 19 - TEMPO PARA ATINGIR 95% DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ACORDO COM EQUAÇÃO 8.....	80
FIGURA 20 - ESTIMATIVAS DE DEGRADAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES DA MADEIRA.....	82
FIGURA 21 - ETAPAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA (IPT, 1986).....	87
FIGURA 22 - TERMOGRAMAS PARA MADEIRA E COMPOSTOS QUÍMICOS DE <i>FAGUS</i> <i>SYLVATICA</i>	90
FIGURA 23 - TERMOGRAMAS PARA MADEIRA DOUGLAS-FIR E RED ALDER.....	92
FIGURA 24 - CURVAS TG E DTG PARA MADEIRA DE <i>PINUS PINASTER</i>	93
FIGURA 25 - TERMOGRAMAS DE HEMICELULOSES ISOLADAS DE 4 ESPÉCIES DE MADEIRA (A) E DE XILANA ISOLADA DE FOLHOSA (B).....	95
FIGURA 26 - TERMOGRAMAS DE LIGNINA DE ACORDO COM A TAXA DE AQUECIMENTO.....	98
FIGURA 27 - ESQUEMA DE CORTE DOS CORPOS-DE-PROVA.....	103
FIGURA 28 - EQUIPAMENTO STRESS WAVE TIMER PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	106
FIGURA 29 - ESPECTROFOTÔMETRO MICROFLASH PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS.....	107
FIGURA 30 - ÍNDICE DE REFRAÇÃO E TEMPO DE PASSAGEM DOS AÇÚCARES PELA COLUMA DE ANÁLISE.....	110
FIGURA 31 - ASPECTO DOS PAINÉIS APÓS O ENSAIO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA E SECAGEM EM ESTUFA.....	130
FIGURA 32 - PERFIL DA ESPESSURA DOS PAINÉIS TRATADOS EM COMPARAÇÃO AO PAINEL TESTEMUNHA.....	159
FIGURA 33 - ESQUEMA DE PRODUÇÃO DE PAINÉIS OSB COM INCLUSÃO DA ETAPA DE ESTABILIZAÇÃO.....	183
GRÁFICO 1 - CURVAS DE AQUECIMENTO DOS PAINÉIS NO ENSAIO PILOTO.....	101
GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DURANTE O TRATAMENTO TÉRMICO.....	123
GRÁFICO 3 - 1ª E 3ª FASES DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS TRATADOS A 190°C.....	124
GRÁFICO 4 - 1ª E 3ª FASE DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS TRATADOS A 220°C.....	125

GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS PAINÉIS OSB.....	128
GRÁFICO 6 - VALORES DE TNRE APÓS O ENSAIO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS OSB.....	129
GRÁFICO 7 - VALORES DE MASSA ESPECÍFICA APÓS O ENSAIO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS (MEie).....	131
GRÁFICO 8 - EFEITO DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO SOBRE IE E ABS, EM 2 E 24 HORAS.....	136
GRÁFICO 9 - EFEITO DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO SOBRE TUE, PMAT E PDMAT. ..	137
GRÁFICO 10 - EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS.	139
GRÁFICO 11 - COMPARAÇÃO PARA VALORES DE FLEXÃO ESTÁTICA PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.....	142
GRÁFICO 12 - COMPARAÇÃO PARA COMPRESSÃO E LIGAÇÃO INTERNA ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.	143
GRÁFICO 13 - COMPARAÇÃO PARA VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DOS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.....	144
GRÁFICO 14 - EFEITO DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA.....	148
GRÁFICO 15 - COMPARAÇÃO PARA PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA, SEM TRATAMENTO.	152
GRÁFICO 16 - ALTERAÇÃO DA COR (ΔE^*) E DA SATURAÇÃO (ΔC^*) DOS PAINÉIS TRATADOS EM RELAÇÃO À TESTEMUNHA.	154
GRÁFICO 17 - REFLECTÂNCIA DOS PAINÉIS DE ACORDO COM TRATAMENTO.....	155
GRÁFICO 18 - PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS DOS PAINÉIS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.	156
GRÁFICO 19 - EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO (MIN) NA CLARIDADE DOS PAINÉIS.....	158
GRÁFICO 20 - REFLECTÂNCIA DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA E O TEMPO DE TRATAMENTO.	160
GRÁFICO 21 - COMPARAÇÃO PARA A PROPORÇÃO DE AÇÚCARES DA HEMICELULOSE ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.....	162
GRÁFICO 22 - COMPARAÇÃO PARA OS COMPONENTES QUÍMICOS BÁSICOS ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.....	163
GRÁFICO 23 - EFEITO DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO SOBRE A PROPORÇÃO DOS AÇÚCARES DA HEMICELULOSE.....	164
GRÁFICO 24 - EFEITO DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO SOBRE A PROPORÇÃO DOS COMPONENTES BÁSICOS DA MADEIRA.....	165
GRÁFICO 25 - EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO NA PROPORÇÃO DOS COMPONENTES QUÍMICOS.	166
GRÁFICO 26 - TAXA DE DEGRAÇÃO TÉRMICA (K) DAS PROPRIEDADES IE24H E TUE.....	170
GRÁFICO 27 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) DAS PROPRIEDADES PMAT E PDMAT.	171
GRÁFICO 28 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) DOS COMPONENTES GALACTOSE E HEMICELULOSE.....	172
GRÁFICO 29 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) DA CLARIDADE (L).	173

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a^*	- Coordenada do eixo vermelho-verde do sistema CIE Lab
ABS	- Absorção de água
ABS2H	- Absorção de água em 2 horas
ABS24H	- Absorção de água em 24 horas
b^*	- Coordenada do eixo azul-amarelo do sistema CIE Lab
c	- Calor específico
C	- Saturação da cor
CP	- Corpo-de-prova
COMP//	- Resistência à compressão paralela à orientação
COMP \perp	- Resistência à compressão perpendicular à orientação
ΔC^*	- Alteração da cor
ΔE^*	- Alteração da saturação
ΔH	- Energia de ativação
EL	- Expansão linear
FM//	- Força máxima em flexão estática paralela à orientação
FM \perp	- Força máxima em flexão estática perpendicular à orientação
GC	- Grau de cristalinidade da celulose
GM	- Ganho de massa
h^*	- Ângulo da tinta
H	- Quantidade de energia transferida
IE2H	- Inchamento em espessura em 2 horas
IE24H	- Inchamento em espessura em 24 horas
IE _T	- Inchamento em espessura total
IE _H	- Inchamento em espessura higroscópico
IE _{TC}	- Inchamento em espessura devido às tensões de compressão
k	- Taxa constante de degradação térmica
Kcal	- Kilocaloria
kPa	- Kilopascal
L^*	- Claridade da cor
LI	- Resistência à tração perpendicular à superfície do painel, ligação interna
ME	- Massa específica dos painéis antes do tratamento
ME _{TRAT}	- Massa específica após tratamento
ME _{IE}	- Massa específica após ensaio de inchamento em espessura
MOE//	- Módulo de elasticidade à flexão estática paralelo à orientação
MOE \perp	- Módulo de elasticidade à flexão estática perpendicular à orientação
MOECOMP//	- Módulo de elasticidade à compressão paralelo à orientação
MOECOMP \perp	- Módulo de elasticidade à compressão perpendicular à orientação
MOED//	- Módulo de elasticidade dinâmico inicial paralelo à orientação
MOED ₁ //	- Módulo de elasticidade dinâmico paralelo à orientação 1 dia após o tratamento

MOED ₃ //	-	Módulo de elasticidade dinâmico paralelo à orientação após tratamento e condicionamento
MOED _⊥	-	Módulo de elasticidade dinâmico inicial perpendicular à orientação
MOED ₁ ⊥	-	Módulo de elasticidade dinâmico perpendicular à orientação 1 dia após o tratamento
MOED ₃ ⊥	-	Módulo de elasticidade dinâmico perpendicular à orientação após tratamento e condicionamento
MOR//	-	Módulo de ruptura à flexão estática paralelo à orientação
MOR _⊥	-	Módulo de ruptura à flexão estática perpendicular à orientação
MPa	-	Megapascal
N	-	Newton
OSB	-	Painel de partículas orientadas, <i>oriented strandboard</i>
PMAT	-	Perda de massa dos painéis após o tratamento
PDMAT	-	Perda definitiva de massa dos painéis, após tratamento e climatização
TIR	-	Taxa interna de retorno
TNRE	-	Taxa de não retorno em espessura
TU	-	Teor de umidade dos painéis antes do tratamento
TUE	-	Teor de umidade de equilíbrio dos painéis após tratamento
URA	-	Umidade relativa do ar
VPL	-	Valor presente líquido

RESUMO

A madeira, dada a natureza higroscópica, apresenta variações dimensionais quando em contato com a umidade. Os painéis reconstituídos de madeira são instáveis também em função das tensões de compressão impostas durante a etapa de prensagem. Essas tensões são liberadas quando o painel entra em contato com a umidade, implicando em variação de suas dimensões. Deste modo, o aumento da estabilidade dimensional tem sido uma grande área de estudos, já estando disponíveis uma série de métodos com esta finalidade. Os painéis de partículas orientadas (OSB) são um tipo de painel aglomerado estrutural que também apresenta instabilidade dimensional. O principal concorrente dos painéis OSB são os compensados, painéis muito mais estáveis. Os métodos propostos para a estabilização dimensional de painéis OSB não são aplicados em nível industrial, seja em função do custo ou de aspectos técnicos e operacionais. Assim, é importante o desenvolvimento de métodos que proporcionem aumento da estabilidade dimensional de painéis OSB, e que ao mesmo tempo sejam viáveis econômica e operacionalmente. Assim, o presente trabalho teve como objetivo principal propor um método para aumentar a da estabilidade dimensional de painéis OSB, e especificamente, avaliar a eficiência deste método em reduzir as variações dimensionais, analisar possíveis alterações com relação às suas propriedades, e por fim estudar a viabilidade operacional e econômica do método, para que possa ser utilizado industrialmente. Painéis OSB foram submetidos a tratamento térmico, que consistiu no aquecimento em prensa. Foram analisadas duas temperaturas (190°C e 220°C) e três tempos (12, 16, 20 minutos) num total de seis tratamentos. Propriedades físicas, mecânicas, colorimétricas e químicas dos painéis tratados foram comparadas com as propriedades de painéis não-tratados (testemunha). Analisou-se também a viabilidade operacional, custo e variáveis econômicas como taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL) e índice benefício-custo (IBC). Os resultados indicaram que o método proporcionou aumento na estabilidade dimensional, reduzindo o inchamento em espessura em até 50%, e a absorção de água em até 33%, em comparação com a testemunha. A comparação com o compensado indicou que estes incham menos em espessura, enquanto que os painéis tratados absorvem e adsorvem menos água. As propriedades mecânicas foram afetadas apenas parcialmente, com redução do módulo de ruptura e força máxima em até 23%. As demais propriedades mecânicas não foram afetadas pelo tratamento térmico. A cor dos painéis foi alterada moderadamente, enquanto que para as propriedades químicas, apenas a hemicelulose, principalmente galactose, foi bastante afetada. Análise mais detalhada demonstrou que a temperatura foi o fator mais importante para as alterações nas propriedades, enquanto que o fator tempo foi significativo principalmente para as propriedades físicas. Dentre os tratamentos avaliados, foram recomendados aqueles que contemplavam temperatura mais baixa por um período mais longo (190°C, 20') e temperatura mais elevada em menor tempo (220°C, 12') por apresentarem estabilidade dimensional superior à da testemunha e demais propriedades similares. O método mostrou-se viável, com impacto no custo de produção não superior a 5%. Adicionalmente, todas as variáveis econômicas analisadas (TIR, VPL, IBC) demonstraram a viabilidade econômica do tratamento térmico proposto.

Palavras-chave: painéis de partículas orientadas, tratamento térmico, estabilidade dimensional, análise de investimentos.

ABSTRACT

Wood is a hygroscopic material and therefore vary its dimensions in contact with moisture. Beyond the hygroscopic nature, reconstituted wood panels also are unstable because of the compression stress during the pressing stage. These stresses are released when the panel contacts the moisture, causing dimensional variations. In view of this, the improvement of the dimensional stability has been a great area of study, with several methods already available for this purpose. The oriented strandboard (OSB) is a type of structural panel that also presents dimensional instability. The main competitor of OSB panels is plywood, mainly because they are much more stable panels. The methods considered for the dimensional stabilization of OSB panels are not applied industrially, either because of the costs involved or due to operational and technical limitations. Thus, it is important to develop methods that provide the improvement of the dimensional stability of OSB panels and at the same time are viable both economically and operationally. The present work had as main objective to propose a method for the improvement of the dimensional stability of OSB, and specifically, to evaluate the efficiency of this method in reducing the dimensional variations, analyzing any possible alterations related to its properties, and finally to study the operational and economic viability of the method. OSB Panels supplied by the a manufacturer were submitted to thermal treatment, in a laboratorial press. Two temperatures (190°C and 220°C) and three times (12, 16, 20 minutes) (a total of six treatments) had been analyzed. Physical, mechanical, colorimetric and chemical properties of the treated panels were analysed, and the results were compared with the properties of untreated panels. The operational viability of the treatment was also analyzed, including cost and economic indicators such as internal rate of return (IRR), net present value (NPV) and cost-benefit index (CBI). The results indicated that treatment improved the dimensional stability, reduced the thickness swelling up to 50%, and the water absorption up to 33%, in comparison with the non-treated panels. The mechanical properties had been affected only partially, with reduction of the maximum force and modulus of rupture up to 23%. Other mechanical properties had not been affected by the thermal treatment. The color of the panels was slightly modified, while among the chemical properties, only hemicelulose (mainly galactose) was significantly affected. A more detailed analysis demonstrated that the temperature of treatment was the most important factor in the alterations of the properties, while that the time factor was significant mainly for the physical properties. Amongst the evaluated treatments, it was recommended the lower temperature for a longer period (190°C, 20 ') and higher temperature in shorter time (220°C, 12 ') because of their superior dimensional stability and similar properties if compared to untreated panels. The method revealed to be viable, with impact in the production cost not superior to 5%. Additionally, all the economic variables (IRR, NPV, CBI) had demonstrated the economic viability of the proposed thermal treatment.

Key-words: oriented strandboard, thermal treatment, dimensional stability, investment analysis.

1 INTRODUÇÃO

Os painéis de madeira são produtos feitos a partir da junção de madeira, adesivo e aditivos. São também conhecidos como compósitos, porque são formados pela junção de mais de um tipo de matéria prima, cujo resultado final é algo que pode ser utilizado e que tem mercado (SOUZA e TEIXEIRA, 2002).

MALONEY (1996) distingue quatro classes de compósitos: painéis de madeira (compensados, painéis de fibra, painéis de partículas orientadas, etc.); produtos moldados (painéis automobilísticos, etc.); produtos inorgânicos (painéis madeira-cimento, etc.); e produtos de madeira sólida (painéis de lâminas paralelas, dormentes, tábuas de partículas paralelas, vigas laminadas, etc.). Segundo esse mesmo autor, na atualidade tem se difundido bastante o emprego do termo *engineered wood products* (produto engenheirado de madeira), para definir produtos como o compensado e os painéis estruturais (partículas orientadas).

No Brasil, são produzidos compósitos de madeira de todas as classes, mas prevalecem os painéis. Dentro desta classe são produzidos, compensados, chapa aglomeradas, chapas de fibra de média (MDF) e alta densidade (HDF), chapas isolantes e painéis de partículas orientadas (OSB). O início da produção de painéis no Brasil ocorreu em 1940, com a instalação da primeira fábrica de compensados, seguindo em 1995, com as chapas de fibra; em 1966, com as chapas aglomeradas; em 1997, com o MDF; e finalmente em 2002, com o OSB (MENDES et al. 2003).

Dados de 2000, compilados a partir de MENDES et al. (2003), indicam que a capacidade de produção brasileira era de 4,7 milhões de m³ de painéis, sendo 42% relativos ao compensado e 58% às chapas aglomeradas, de fibras e MDF. Com a instalação em 2002 da primeira fábrica de OSB, com capacidade de produção de 350 mil m³ por ano e os diversos planos de expansão de fábricas já instaladas, estima-se que na atualidade a capacidade brasileira seja superior a 5,5 milhões de m³ de painéis por ano.

As exportações são impulsionadas principalmente pelo compensado, com volume de quase 50% do produzido, enquanto que para os demais tipos de painéis quase toda a produção (92%) é consumida internamente. As exportações de painéis de madeira somaram em 2002, algo em torno de US\$ 535,5 milhões, sendo que 80% desse valor correspondem ao compensado, conforme dados compilados em REVISTA DA MADEIRA (2003).

Os painéis compensados e OSB podem ser considerados similares em na concepção enquanto compostos de madeira. Em ambos está embutido o princípio da laminação cruzada, que melhora a estabilidade dimensional da superfície do painel e reduz, em parte a anisotropia, relativa à umidade e aos esforços mecânicos, que são comuns na madeira sólida. Por isso, freqüentemente são empregados para uma mesma finalidade, implicando em que nos países onde são produzidos há um disputa acirrada no mercado. As similaridades terminam aí, e as matérias-primas (tipo e origem), o modo de produção e as propriedades são muito distintos.

Acredita-se que a principal limitação do OSB seja a sua baixa estabilidade dimensional frente ao compensado. O OSB quando entra em contato com a umidade incha em espessura e expande linearmente muito mais que o compensado. A capacidade de contrair e inchar quando em contato com a umidade é uma das propriedades mais problemáticas da madeira e de seus subprodutos do ponto de vista estrutural. Essa característica é inerente a todas as espécies e subprodutos e a sua compreensão é objeto do estudo de muitos pesquisadores.

São vários os tipos de tratamentos que podem ser empregados para melhoria da estabilidade dimensional da madeira: o preenchimento (PAZ e SANABRIA, 2000; UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 1999; YALINKILIC et al., 1999; ROWELL e YOUNGS, 1981); a modificação química (CHANG e CHANG, 2003; HILL e MALON, 1999) e o tratamento térmico (ISHIGURI et al., 2001a; SYRJANEN e KANGAS, 2000; PINCELLI, 1999; KIM et al. 1998; KOLIN e JANEZIC, 1996; CHEN e WORKMAN JR, 1980).

O tratamento térmico é muito empregado na Europa, e o objetivo principal é o de melhorar a estabilidade dimensional e aumentar a resistência biológica da madeira frente a organismos xilófagos. De acordo com MILITZ (2002) existem atualmente na Europa cinco processos para o tratamento térmico da madeira: *Plato-Process* (Holanda), *Retificação* (França), *Bois Perdure* (França), *OHT-Process* (Alemanha) e *Thermo Wood Process* (Finlândia).

Os compostos de madeira têm comportamento distinto ao da madeira sólida em relação à estabilidade dimensional. Além dos fatores inerentes à própria madeira, há também, como explicam HAYGREEN e BOWYER (1996), fatores relacionados ao processo de produção e às matérias primas empregadas. Os painéis reconstituídos (OSB, aglomerados, etc.) quando expostos a condições de alta umidade ou em contato direto com a água líquida incham em função da liberação das tensões impostas durante a prensagem e pela natureza higroscópica própria da madeira, causando alterações dimensionais do painel. Ocorre também um inchamento no sentido da superfície, conhecido como expansão linear.

Deste modo, segundo MOSLEMI (1974), os esforços para a melhoria da estabilidade dimensional de painéis reconstituídos devem ser focados para dois aspectos básicos principais: a redução da higroscopicidade da madeira utilizada e a liberação das tensões impostas durante a prensagem do painel. De fato, embora 30 anos já se passaram, desde a afirmação de Moslemi, os processos empregados e/ou estudados para estabilização dimensional de painéis têm como foco esses princípios básicos.

Os pré-tratamentos são aqueles usualmente aplicados ao material antes da prensagem e consolidação do painel e podem ser a vaporização (SEKINO, et al. 1999; ROWELL et al., 1995; HSU et al., 1988), e a modificação química (HOUTS et al., 2003; OKINO et al., 1997; KAJITA e IMAMURA, 1993). Esses tratamentos têm o objetivo de alterar a higroscopicidade do material.

Por outro lado, os pós-tratamentos são aqueles aplicados ao painel já consolidado, onde basicamente é empregado o tratamento térmico nas suas variadas formas (SUCHSLAND e XU, 1991; HSU et al. 1989; ROFFAEL e RAUCH, 1973; SHEN, 1974). O objetivo é liberar as tensões de compressão formadas durante a prensagem. Há ainda outras formas de melhorar a estabilidade dimensional de painéis reconstituídos, mas que não implicam necessariamente em tratamentos específicos, e estão relacionados à tecnologia de produção, como teor de adesivos (MENDES, 2001; HASHIM et al. 2001, KELLY, 1977; BEECH, 1975; MOSLEMI, 1974; HALLIGAN, 1970), adição de repelentes de água (BAILEYS et al., 2003; IWAKIRI et al. 2003; WINISTORFER et al., 1992), e forma de construção do painel (WU e LEE, 2002; WU e REN, 2000; IWAKIRI et al. 1999, AVRAMIDIS e SMITH, 1989).

Em nível industrial o tratamento térmico é empregado principalmente em painéis de fibra (MDF, HDF), enquanto que na indústria de painéis de aglomerados de partículas, as estratégias têm sido no sentido de alterar as tecnologias de produção citadas anteriormente. Entretanto, a eficácia da alteração da tecnologia de produção sobre a estabilidade dimensional de painéis aglomerados é relativamente limitada, ainda mais quando se compara com o investimento a ser feito, ou seja, a relação custo-benefício não é satisfatória.

Como pode ser notado, o tratamento térmico pode ser utilizado tanto como um pré-tratamento, como no pós-tratamento dos painéis. A versatilidade do tratamento térmico está na possibilidade de atacar simultaneamente os dois principais fatores que influenciam a estabilidade dimensional de painéis, citados por MOSLEMI (1974). Assim, em uma mesma operação têm-se a redução da higroscopicidade da madeira e a redução das tensões de compressão, implicando em melhoria da estabilidade dimensional.

Entretanto, o tratamento térmico da madeira pode implicar em impactos negativos em suas diversas propriedades, como é fartamente apresentado pela literatura. (KUBOJIMA et al. 2000; KIM et al. 1998; ROWELL e YOUNGS, 1981, KOLLMANN e COTÊ JR., 1968; STAMM, 1964; WANGAARD, 1950).

Diante do exposto, a hipótese principal do trabalho é que a alteração da higroscopicidade da madeira e o relaxamento das tensões de prensagem podem ser obtidos através de tratamento térmico adequado, o que implicará na melhoria da estabilidade dimensional, e dadas as condições em que será feito, afetará em menor magnitude as demais propriedades de painéis de partículas orientadas.

Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo central a melhoria da estabilidade dimensional de painéis de partículas orientadas, e especificamente três objetivos:

- a) Propor um tratamento térmico que melhore a estabilidade dimensional de painéis de partículas orientadas;
- b) Avaliar os efeitos deste tratamento sobre as propriedades dos painéis e comparando-as com as propriedades de painéis não-tratados e de painéis compensados;
- c) Avaliar técnica e economicamente o tratamento proposto visando sua utilização em nível industrial.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INSTABILIDADE DIMENSIONAL DA MADEIRA E DE SEUS SUBPRODUTOS

2.1.1 Conceitos Básicos e Origem da Instabilidade da Madeira

A água na madeira localiza-se na parede e no lume das células. A água depositada no lume é chamada de *água livre*, enquanto que aquela depositada na parede celular recebe o nome de *água higroscópica*. A água higroscópica está ligada à madeira por meio de forças de adsorção, que envolve a atração de moléculas de água aos sítios de hidrogênio presentes na celulose, na hemicelulose e na lignina (HAYGREEN e BOWYER, 1996). O *teor de umidade* da madeira (TU) é a expressão do montante de água livre e higroscópica presentes no lume e na parede celular.

Estas ligações de hidrogênio ocorrem nos grupos hidroxila (OH) presentes nos componentes químicos da madeira, e a formação dessas ligações libera energia que é medida como sendo o calor de hidratação da madeira. Por esse motivo, é necessário fornecer energia para remover as moléculas de água durante a secagem da madeira (PANSIN e DE ZEEUW, 1970). A adsorção de moléculas de água nos grupos hidroxila pode ser monomolecular, quando apenas uma molécula está adsorvida naquele sítio, ou polimolecular, quando há várias moléculas de água adsorvidas. Em madeira saturada cinco a seis moléculas podem ser atraídas em cada sítio disponível.

As moléculas que compõem a parede celular são compostas por duas regiões: amorfa e cristalina. Na *região cristalina*, os grupos OH das moléculas de celulose estão interligados o que significa que não há sítios livres para a adsorção das moléculas de água. Trata-se de uma região bastante ordenada do ponto de vista

químico. Por outro lado, na *região amorfa*, há uma certa desordem, e os grupos OH não estão interligados, encontrando-se disponíveis para fazer ligações com as moléculas de água.

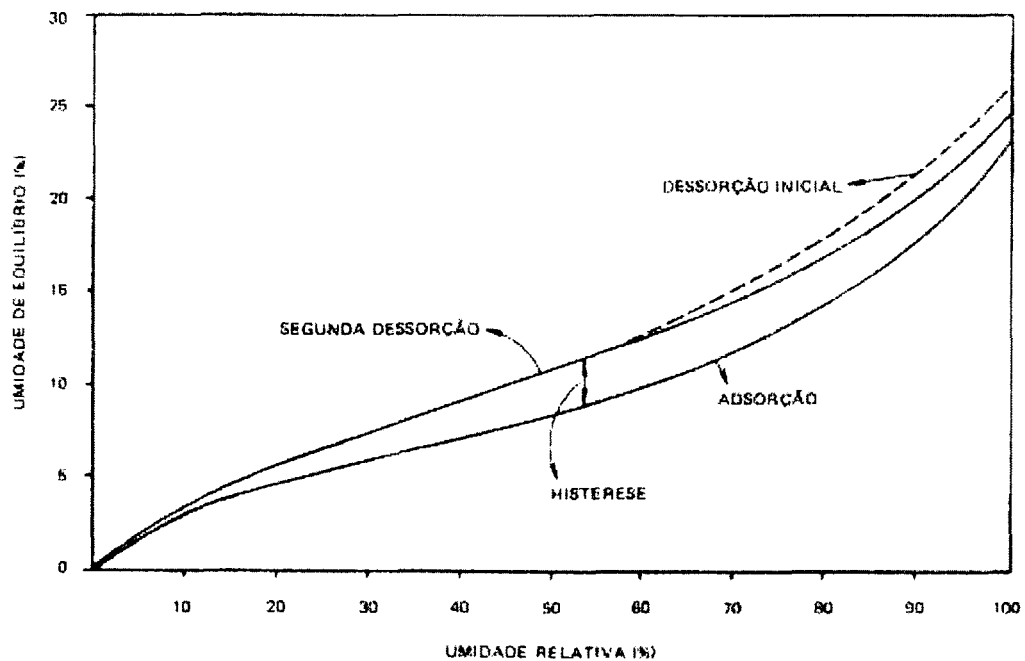
Quando uma peça de madeira é exposta em condições atmosféricas, ela tende a perder água para o ambiente. Quando toda a água livre é removida da madeira, permanecendo apenas água higroscópica, ou seja, apenas a água adsorvida na parede celular tem-se aí o *ponto de saturação das fibras (PSF)*. Este é um ponto crítico para a madeira, que tem suas propriedades bastante alteradas quando seu conteúdo de umidade está abaixo deste ponto. Deste ponto em diante, a retirada de água higroscópica implica em alterações significativas nas diversas propriedades da madeira. Embora possam ocorrer variações, o PSF da madeira é admitido como sendo em torno de 30%.

Dando continuidade ao processo de perda de água, e após a perda de toda a água livre, tem-se início a perda da água higroscópica. Esta perda ocorre até um certo nível, em que o teor de umidade da madeira entra em equilíbrio com as condições atmosféricas. Este ponto é chamado de *teor de umidade de equilíbrio da madeira (TUE)*, sendo aproximadamente proporcional à umidade relativa do ar (URA). Vários fatores influenciam o TUE da madeira, tais como: espécie, cerne/alburno, tipo e proporção de componentes da parede celular, extrativos, temperatura ambiente, história de exposição e tensões mecânicas (SKAAR, 1988).

O fator mais importante que afeta o TUE é a URA. Se uma peça de madeira, com teor de umidade (TU) de 30%, é exposta a condições de URA decrescentes, esta tenderá a assumir um valor de TUE cada vez menor, formando uma curva de dessorção sigmoidal (Figura 1). Da mesma forma, quando a madeira é exposta a condições de URA crescentes, assumirá valores de TUE, cuja forma da curva (isoterma) de adsorção também é sigmoidal. No entanto, essas curvas não são coincidentes, e a curva de adsorção estará plotada logo abaixo da curva de dessorção (BROWN et al. 1952). SKAAR (1988) define a magnitude da histerese

como sendo a relação entre o TUE na adsorção e na dessorção (A/D). Essa diferença entre dessorção e adsorção implica em que a madeira se comporte diferente quando entra em contato com água ou quando esta é retirada, causando assim a instabilidade dimensional.

FIGURA 1 - ISOTERMAS DE SORÇÃO DA MADEIRA.



FONTE: GALVÃO e JANKOWSKY (1985).

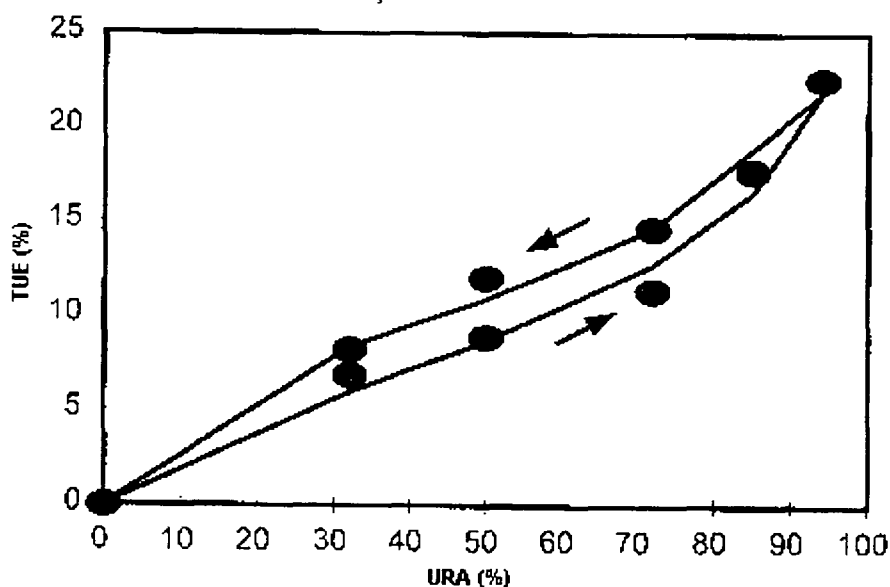
As isotermas de sorção de materiais compostos de madeira (compensados, aglomerados, OSB) são diferentes daquelas obtida em madeira sólida. Esta diferença é atribuída em grande parte ao tratamento com calor e pressão a que estes compostos são submetidos quando são produzidos (WU e REN, 2000). O calor, como será visto mais adiante, reduz a higroscopicidade da madeira, e a pressão compacta as camadas externas do painel, tornando os sítios de adsorção menos disponíveis. Por este motivo, é comum que os painéis aglomerados se equilibrem com o ambiente em menor TUE que a madeira.

HALLIGAN (1970) cita um trabalho de PERKITNY e SZYMANKIEWICZ¹ em que painéis aglomerados feito com pinus apresentaram TUE (22%) inferior ao TUE (29%) da madeira sólida, sob mesmas condições ambientais.

KELLY (1977) argumenta que a densidade é o principal fator a diminuir o TUE em painéis aglomerados, além disso, os adesivos empregados também podem exercer um bloqueio adicional aos sítios de adsorção. Como os painéis são mais densos na superfície que no centro, tem-se a formação de um gradiente de TUE através de sua espessura (WU e REN, 2000).

WU e REN (2000) estudaram as isotermas de OSB (camada simples e de três camadas) submetidos a ciclos de condições atmosféricas por longo período (35%-95% umidade; 6-12 meses). Pela Figura 2 observa-se que a curva de adsorção é mais baixa que a de dessorção indicando que tal como na madeira os painéis OSB também apresentam histerese.

FIGURA 2 - ISOTERMAS DE SORÇÃO DE PAINÉIS OSB.



FONTE: WU e REN (2000).

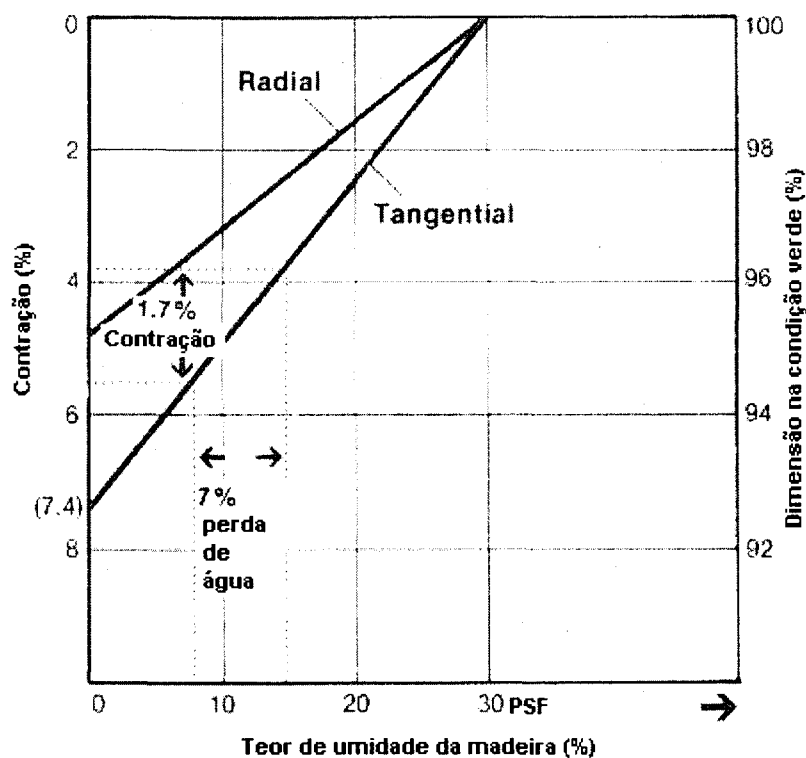
¹ PERKITNY, T.; SZYMANKIEWICZ, H. Verlauf und geschwindigkeit von feuchtigkeits-änderungen in holz und spanplatten in abhängigkeit von differenz zwischen anfangs und ausgleichfeuchtigkeit. **Holztechnologie**, v. 4, p. 17-22. 1963.

Os autores identificaram que para os painéis de camada única o fator mais determinante para TUE foi a massa específica; painéis mais densos apresentaram menor TUE. Para os painéis de três camadas as diferenças entre as curvas de dessorção e adsorção numa dada URA foi maior em comparação com os painéis de camada única. Assim, identificou-se mais um fator que influencia TUE de painéis OSB: o tipo de construção empregado (camadas simples ou múltiplas).

Como dito anteriormente, a madeira, com TUE abaixo do PSF, tem seu comportamento frente aos mais diversos fenômenos físicos e mecânicos bastante alterado. Quando a madeira perde água higroscópica, contrai-se, reduzindo assim suas dimensões. A contração ocorre porque a água higroscópica, adsorvida entre as cadeias de celulose e hemicelulose, é retirada forçando então a aproximação destas cadeias. Assim, a contração da madeira ocorre na proporção da retirada da água higroscópica (HAYGREEN e BOWYER, 1996), bem como na proporção da quantidade de massa de parede celular (PANSIN e DE ZEEUM, 1970). A contração da madeira apresenta valores distintos em seus três eixos estruturais: maior no eixo tangencial (3,5-15%) e menor no eixo longitudinal (0,1-1%), enquanto que no eixo radial apresenta valores medianos (2,4-11%). A relação entre a contração no eixo tangencial e no radial é chamada de *coeficiente de anisotropia* da madeira.

Na Figura 3 pode-se observar, que de um modo geral, existe uma relação linear entre a quantidade de água retirada e a contração da madeira: para uma redução de 7% no teor de umidade da madeira (15 para 8%), tem-se uma redução de 1,7% em suas dimensões.

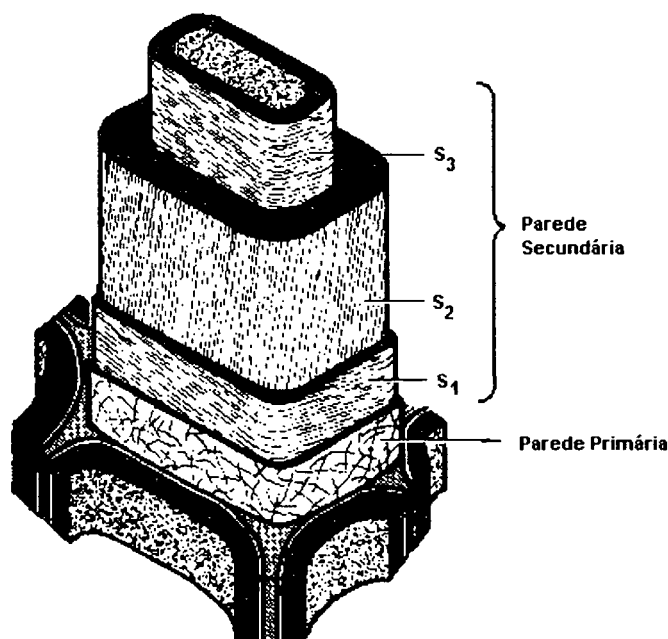
FIGURA 3 - ESTIMATIVA DE CONTRAÇÃO EM FUNÇÃO DA PERDA DE ÁGUA.



FONTE: HAYGREEN E BOWYER (1996).

A origem dessa diferença entre os eixos está intimamente relacionada às microfibrilas da parede celular. A parede celular é dividida em duas, a primária e a secundária, sendo esta última subdividida em três camadas: S_1 , S_2 , e S_3 . A Figura 4 apresenta a estrutura típica da parede celular. Observa-se que as microfibrilas das camadas secundárias estão dispostas distintamente em relação ao eixo longitudinal da célula. O ângulo formado pelas microfibrilas de S_2 e o eixo longitudinal é menor que 30° , enquanto que para S_1 e S_3 é próximo de 90° . Como a camada S_2 é muito mais espessa (5 a 100 vezes) que as demais, há predominância desta camada em relação à contração.

FIGURA 4 - ESQUEMA DA PAREDE CELULAR DAS FIBRAS.



FONTE: HAYGREEN e BOWYER (1996).

PANSHIN e DE ZEEUM (1970) explicam que essa diferença de contração entre os eixos pode ser explicada através das seguintes teorias:

- a) A parede celular é formada pelas microfibrilas, de elevada resistência à tração no sentido do eixo longitudinal, que estão encrustadas na região amorfa da matriz formada pela lignina e celulose: com a remoção das moléculas de água das microfibrilas, a mudança no sentido longitudinal e lateralmente é pequena;
- b) A maioria das células da madeira está disposta longitudinalmente, ou seja, paralela à grã, e por causa do efeito das microfibrilas, discutido no parágrafo anterior, a madeira muda muito pouco no sentido longitudinal e de modo considerável nos eixos transversais;

As explicações sobre a contração da madeira, pela retirada da água higroscópica, também podem ser aplicadas no sentido inverso, ou seja, introdução da água na madeira. Assim, tem-se o movimento inverso ao da contração, chamado de inchamento. No inchamento moléculas de água ligam-se novamente aos sítios de

adsorção da parede celular. A madeira tem suas dimensões alteradas até o ponto que toda a parede esteja saturada. A partir daí a água introduzida na madeira passa a ocupar o lume das células.

Como visto anteriormente a instabilidade dimensional da madeira está relacionada às características e fenômenos, tais como: anatomia, higroscopicidade, histerese, composição química, entre outros. A instabilidade dimensional de painéis de madeira também está relacionada a esses fatores, como foi discutido anteriormente, mas adicionalmente outros fatores concorrem para que o seu comportamento seja distinto ao observado na madeira sólida. A variação dimensional de painéis ocorre em espessura e linearmente. Os valores dessas variações oscilam entre 0,25-0,55%, linearmente, enquanto que para a espessura não há padrão de valores. Segundo HAYGREEN e BOWYER (1996) essa diferença é devida basicamente a três fatores:

- a) Grau de restrição ao inchamento proporcionado pelos diferentes produtos que compõem o painel;
- b) Grau de compressão a que foi submetido ao material (lâmina, partículas, fibras) durante a manufatura do painel, e;
- c) Efeito dos adesivos e aditivos empregados na manufatura do painel.

O primeiro fator está relacionado principalmente ao compensado, embora possa também estar relacionado aos painéis OSB, cujas camadas também são dispostas perpendicularmente entre si. A colagem e disposição das lâminas, perpendicularmente entre si, na produção do compensado propicia, que a contração e o inchamento sejam limitados pela lâmina adjacente. Assim, a movimentação dimensional do compensado estará sujeita às características da madeira da lâmina que o compõem. A adesão entre as lâminas é um fator determinante para que o compensado, como um todo, possa resistir à movimentação dimensional de cada uma das lâminas.

O segundo fator está relacionado principalmente aos painéis reconstituídos (aglomerado, OSB, fibras) em que o colchão de partículas é comprimido até a espessura final do painel. Essa compressão reduz o colchão em até 10 vezes, introduzindo tensões de compressão. Após a prensagem e consolidação do painel essas tensões se manterão presentes. Quando o painel entra em contato com a umidade, essas tensões são liberadas provocando assim a alteração dimensional do painel, mais intensa no sentido da espessura. Embora estejam menos sujeitos a essas tensões, pressão excessiva na consolidação também pode implicar em inchamento em espessura de compensados. Além do inchamento proporcionado pela liberação das tensões de compressão, há também o inchamento próprio da madeira.

O terceiro fator que distingue a movimentação dimensional dos painéis da movimentação típica da madeira sólida é a presença de aditivos. Parafina e preservativos são os aditivos mais comuns. A parafina, embora não altere o TUE, age como um repelente de água, tornando o painel mais hidrófobo com relação à água líquida. Por outro lado o adesivo pode penetrar em algum grau a parede celular preenchendo-a ou mesmo substituindo as moléculas de água (HAYGREEN e BOWYER, 1996).

LEHMANN (1972) estudou os mecanismos envolvidos na instabilidade dimensional de painéis aglomerados. Os painéis foram submetidos a ambiente de alta umidade (32°C, 90%) por longos períodos (2-500 horas). Plotando os valores obtidos, observou-se que o logaritmo do tempo é altamente relacionado aos valores de absorção de água. Inicialmente os valores são bem elevados, mas a medida que o tempo passa, esses tendem a diminuir acentuadamente. A expansão linear e o inchamento em espessura foram altamente correlacionados com a absorção de água.

VITAL et al. (1980) estudaram o efeito dos parâmetros de produção sobre a estabilidade dimensional de painéis aglomerados e *flakeboards*. Avaliou-se umidade relativa do ar, geometria de partículas, massa específica do painel e tipo de adesivo. Os modelos de regressão indicaram que o inchamento em espessura para os *flakeboards*, tal como observado por LEHMANN (1972), foi altamente influenciado pela absorção de água, e também pela massa específica.

DEL MENEZZI et al. (1996) avaliaram as propriedades de painéis aglomerados produzidos com mistura de eucalipto e pinus. Os resultados apontaram para uma boa estabilidade dimensional das chapas feitas 100% de eucalipto na fase inicial do teste de inchamento (2 horas). Os autores chamam atenção para uma variável que pode explicar esse resultado: a taxa de compressão. Esta taxa relaciona a massa específica do painel e a massa específica da madeira. Quando se emprega madeira mais densa, como no caso do eucalipto, a taxa é reduzida, implicando em maior porosidade da chapa. Quando a chapa é imersa, a água inicialmente ocupa os espaços vazios e em menor magnitude a parede celular, o que implica apenas em um pequeno inchamento, que nessa situação, foi similar ao das chapas comerciais. Com o tempo, a água que ocupou os espaços vazios se difunde para a parede celular da madeira em maior magnitude, causando assim aumento significativo do inchamento.

2.1.2 Implicações no Uso

Para uma utilização final adequada da madeira e de seus subprodutos estes devem estar secos. O conceito de seco deve ser entendido não como o material totalmente livre de água, mas com um TU próximo ao TUE, que como visto anteriormente, é determinado pelas condições ambientais (URA e temperatura). Quando se seca a madeira até o TUE médio, proporcionado pelas condições atmosféricas onde vai ser empregada, tem-se o objetivo de reduzir a sua movimentação dimensional.

A resposta da madeira à alteração nas condições ambientais não é imediata. Portanto, para que ocorra a variação dimensional é necessário que as novas condições ambientais sejam mantidas por um determinado período. Assim, mesmo com grandes flutuações ambientais por curto período de tempo a madeira não tem tempo para atingir um novo TUE. (HAYGREEN e BOWYER, 1996).

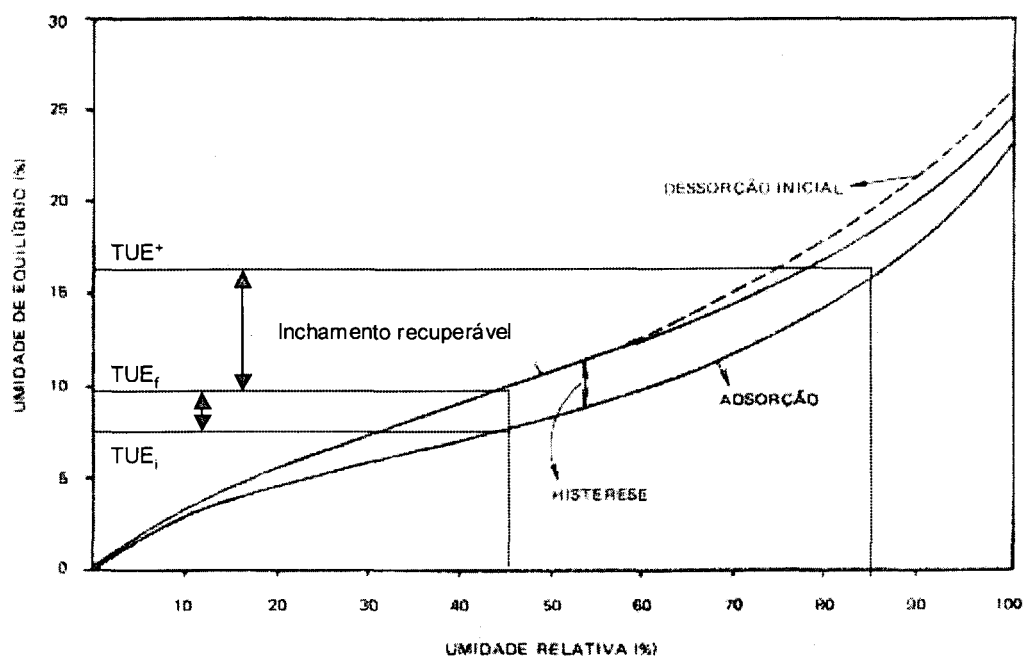
Este comportamento instável deve ser observado quando da utilização da madeira, em seus mais diversos usos. Quando um piso de madeira maciça é instalado, deve-se levar em consideração o seu TU, o TUE médio proporcionado pelas condições ambientais do local de uso, o local da instalação (interior ou exterior) bem como os valores de contração e inchamento da madeira. Por exemplo, em países do Hemisfério Norte, onde é comum o uso de aquecimento interno durante o inverno, a madeira no interior da habitação pode atingir TUE muito baixo (1-3%), enquanto que durante o verão, com a refrigeração, o TUE pode atingir 11-13%. Assim recomenda-se que nessas condições a madeira seja seca até um TU de 6-8% (HAYGREEN e BOWYER, 1996). Adicionalmente recomenda-se levar em consideração o comportamento da madeira com relação ao inchamento e a contração.

Por esse motivo é comum na instalação de carpetes de madeira (feitos de HDF) deixar uma pequena distância das paredes, tanto no sentido transversal quanto longitudinal. Para pisos de madeira maciça, como os parquet, é comum aplicar cola entre os tacos para que a movimentação dimensional possa ocorrer sem prejuízos à instalação.

Em madeiras cujo fenômeno da histerese é mais pronunciado, ou seja, naquelas com alta relação A/D, o seu efeito sobre a instabilidade dimensional pode ser mais significativo. A Figura 5 ajudará na compreensão deste efeito. Quando uma peça de madeira, inicialmente em equilíbrio (TUE_i) com o ambiente (URA 45%), é exposta a novas condições (URA 85%) ocorre adsorção e o seu TUE aumenta, até que se equilibre com estas novas condições (TUE^+). Quando o TU da peça passou

de TUE_i para TUE^+ , ocorreram alterações dimensionais, que nesse caso foram de inchamento.

FIGURA 5 - INFLUÊNCIA DA HISTERESE NA MOVIMENTAÇÃO DIMENSIONAL.



FONTE: MODIFICADO A PARTIR DE GALVÃO e JANKOWSKY (1985).

Se as condições ambientais iniciais são restabelecidas (45% URA), a madeira tende a dessorver as moléculas de água, atingindo um novo valor (TUE_f) que nesse caso é superior ao TUE_i , uma vez que a curva de dessorção é superior a de adsorção. A redução de TUE^+ para TUE_f implica em alterações dimensionais que nesse caso são de contração da madeira. Assim, a madeira não retorna ao seu teor de umidade de equilíbrio inicial, retornando a um teor superior, e a movimentação dimensional proporcionada pela alteração de TUE_i para TUE_f , não é recuperada (seta menor). Apenas a movimentação proporcionada pela alteração entre TUE^+ para TUE_f é recuperada (seta maior). A madeira então passa a ter uma dimensão ligeiramente superior àquela inicial, que é proporcional a alteração $TUE_i - TUE_f$.

Não é difícil de compreender que esse fenômeno se repetirá a cada mudança temporária das condições ambientais. No entanto, a tendência é que a isoterma de dessorção, a cada novo ciclo, se aproxime da isoterma de adsorção,

indicando que o TUE da madeira na dessorção diminui, ou seja, TUE_i se aproximará de TUE_e . Retornando à Figura 5, observa-se que a histerese entre a dessorção inicial e a adsorção é mais pronunciada, que a existente entre a dessorção secundária e a adsorção. Esta diferença é mais evidente em URA superiores a 50%. Segundo SKAAR (1988) trata-se de uma perda irreversível de higroscopicidade após a secagem inicial da madeira, e que embora as isothermas se aproximem não se coincidirão, alcançando no máximo um equilíbrio com passar do tempo.

Como explicado anteriormente, uma das diferenças entre a instabilidade dimensional da madeira sólida e de painéis está relacionada às tensões de compressão que estes são submetidos no momento de sua produção. Quando em uso, o painel estará sujeito a absorção e adsorção de água tal como a madeira sólida. Pela Figura 6 observa-se que o ganho de umidade de um painel de espessura inicial (E_i) causa o seu inchamento, principalmente em espessura.

FIGURA 6 - MECANISMO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS.



Esse inchamento em espessura total (IE_T) é devido a soma de dois principais fatores. O primeiro é aquele relacionado à natureza higroscópica, própria da madeira, e uma vez retirada a umidade do painel este tende a recuar. A esse tipo de inchamento dá-se o nome de *inchamento em espessura higroscópico* (IE_H). O segundo tipo está relacionado ao inchamento devido à liberação das tensões de compressão, e cuja a retirada da umidade não permite o recuo à espessura inicial. Tem-se nesse caso, o *inchamento em espessura pelas tensões de compressão* (IE_{TC}), podendo ser chamando também de *taxa de não-retorno em espessura*.

(TNRE). Desse modo, o painel tem sua dimensão definitivamente alterada, com a sua espessura (E_F) não retornando mais ao valor inicial (E_I).

Uma vez que o painel teve sua espessura final aumentada em função do inchamento proporcionado pela exposição à umidade, isso implica em redução da sua massa específica, ou seja, tem-se uma massa de partículas distribuída por um volume maior de painel. Por isto o inchamento em espessura normalmente é acompanhado pela perda de resistência do painel (LEE e WU, 2002). Estes autores evidenciaram que o inchamento de painéis no plano longitudinal, embora seja de menor magnitude que o IE, gera tensões internas que reduzem os valores do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade na flexão estática.

A contribuição de cada tipo (IE_H e IE_{TC}) para o inchamento em espessura total (IE_T) é bastante variável, sendo que alguns fatores determinantes são: a espécie de madeira, os parâmetros de prensagem, o teor e o tipo de adesivos, a geometria de partículas (HALLIGAN, 1970), entre outros. Entretanto, mantidos todos os demais fatores constantes, o aumento no teor de adesivos, por si só, implica em melhoria da estabilidade dimensional de painéis, como pode ser visto pela literatura (MENDES, 2001; HASHIM et al. 2001; HAYGREEN e BOWYER, 1996; AVRAMIDIS e SMITH, 1989; KELLY, 1977; BEECH, 1975; MOSLEMI, 1974). A melhoria ocorre porque o aumento do teor de adesivos pode causar duas conseqüências. A primeira está relacionada à penetração do adesivo na parede celular (HAYGREEN e BOWYER, 1996) e foi descrita no item 2.1.1. A outra está relacionada ao ganho na qualidade da colagem, fazendo com que o painel resista mais eficientemente à liberação das tensões de compressão, restringindo assim o inchamento em espessura.

2.2 ESTABILIZAÇÃO DIMENSIONAL DA MADEIRA E DE SEUS SUBPRODUTOS

Foi visto nos parágrafos anteriores qual é a origem e quais são as implicações da instabilidade dimensional da madeira e de seus subprodutos. Uma vez conhecido isto, são propostos métodos que tenham como foco as origens e causas desta instabilidade. Alguns autores (SKAAR, 1988; KOLLMANN et al., 1975; STAMM, 1964) dividem estes métodos em cinco classes: laminação cruzada, revestimento, redução da higroscopicidade termicamente, alteração química e preenchimento. Observa-se que as duas primeiras classes de tratamento estão relacionadas à forma com o que o produto é manufaturado e/ou utilizado. Trata-se portanto, de tratamentos relativos à *tecnologia de produto*. As outras classes são relativas a alterações proporcionadas à madeira. São, portanto, métodos que propõem o *tratamento da madeira* pelas vias química ou térmica que, em última análise alteram a composição química da madeira. Nesse item 2.2 serão abordadas todas essas classes, exceto o *tratamento térmico* que será abordado separadamente e de forma mais profunda no item 2.3.

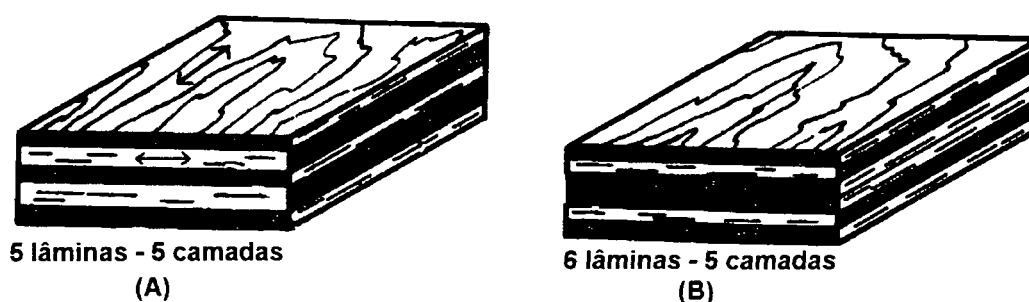
Muitos índices têm sido usados para expressar o grau de estabilização dimensional proporcionado por um determinado tratamento: eficiência anti-contracção, inchamento em porcentagem, eficiência de estabilização dimensional, eficiência anti-inchamento, porcentagem de redução em inchamento. A eficiência dos métodos está principalmente em reduzir a movimentação dimensional (contracção e/ou inchamento) da madeira.

2.2.1 Tecnologia de Produto

2.2.1.1 Laminação Cruzada

Sabe-se que a contração e o inchamento da madeira são diferentes em seus 3 eixos estruturais e sua intensidade é maior no eixo tangencial, seguida pelo radial e apresentando menor intensidade no eixo longitudinal. Esse método consiste na colagem de lâminas de madeira em ângulos de 90° entre a direção da grã de modo que o inchamento no eixo tangencial de uma seja restringido pelo eixo longitudinal da outra (Figura 7). Geralmente o número de camadas é ímpar e é igual ao número de lâminas (Figura 7a), embora seja possível um número ímpar de camadas produzidas por um com número par de lâminas (Figura 7b). É o princípio de produção do compensado, um dos produtos florestais mais empregados na atualidade.

FIGURA 7 - PRINCÍPIO DE LAMINAÇÃO CRUZADA EMPREGADO NA PRODUÇÃO DO COMPENSADO.



Embora não previna a contração e o inchamento, a laminação cruzada muda a direção de ocorrência e reduz a sua intensidade. STAMM (1964) cita que lâminas desenroladas com densidade básica de $0,45\text{g/cm}^3$ têm inchamento, com a variação da umidade relativa do ar (URA) de 30 a 90%, na ordem de 3,5% no eixo tangencial e de 0,1% na direção às fibras (eixo longitudinal) e que quando um número ímpar de camadas são dispostas cruzadas na formação do compensado, o

inchamento resultante será equivalente a 1/10 da porcentagem em ambas as direções.

O princípio da laminação cruzada também tem sido utilizado na produção e desenvolvimento de painéis reconstituídos de madeira, conhecidos como OSB (*oriented strand board*). Na produção do OSB são utilizadas partículas de madeira orientadas formando camadas dispostas perpendicularmente entre si. Como no compensado, as camadas externas são paralelas entre si, com a camada interna disposta perpendicularmente.

Nesse tipo de painel uma característica importante sobre as propriedades físicas e mecânicas é a relação entre a massa de partículas na superfície e a no centro (miolo). A aumento dessa relação (maior massa de partículas na superfície) reduz o inchamento linear do painel no sentido paralelo à orientação, entretanto, pode aumentá-lo no sentido perpendicular, como foi observado por AVRAMIDIS e SMITH (1989).

2.2.1.2 Revestimentos

Um dos modos mais utilizados para limitar a movimentação dimensional da madeira é a aplicação de revestimentos, tais como tintas e vernizes. Esses produtos formam uma película sobre a madeira que age como uma barreira física para entrada de água líquida (exclusão da água) e também limitam a adsorção e dessorção do vapor de água.

Entretanto, a madeira não é completamente estabilizada e a durabilidade da película depende de uma complexa interação entre a superfície da madeira, o produto, a técnica de aplicação e as condições de serviço as quais está exposta. De um modo geral tintas oleosas tendem a ficar menos elásticas com o passar do tempo, tornando-se assim mais quebradiças, ocasionando o descascamento e conseqüente desproteção da madeira. Sendo assim, a tendência tem sido a utilização de produtos a base de água tais como emulsões acrílicas que, embora

sejam muito mais permeáveis ao vapor de água propiciando o movimento da madeira, produzem um filme termoplástico retendo assim a sua elasticidade, evitando o descascamento (USDA, 1999).

Produtos de acabamento tais como tintas à base d'água, vernizes, lacas, látex, óleos, ceras e resinas quase que invariavelmente perdem sua capacidade de excluir a água, medida em testes cíclicos, em menos de um ano. Sendo assim, esses produtos têm apenas um efeito temporário na redução do inchamento e da contração da madeira. Deste modo a sua eficiência não é avaliada de acordo com o a sua eficiência em reduzir o inchamento e sim na sua capacidade de excluir a umidade. Entenda-se aqui por excluir, a capacidade de evitar o contato direto da madeira com a água ou a umidade.

Outra classe de produtos é a dos os repelentes de água. Esses produtos possuem um fungicida, uma pequena quantidade de cera como repelente de água, resinas naturais e solventes. Entretanto, o máximo que um repelente de água pode fazer é recobrir microscopicamente os vazios visíveis da madeira durante uma imersão prolongada. São normalmente aplicados em banhos de imersão de 3 minutos, o que possibilita a penetração na superfície a uma profundidade de menos de 4 mm no cerne de algumas madeiras.

A eficiência desses produtos em excluir a água da madeira depende de um grande número de fatores entre eles: espessura, defeitos e vazios da película, tipo de pigmento, composição química do veículo (solvente), relação de volume entre pigmento/veículo, gradiente de pressão de vapor através da película e o tempo de exposição (USDA, 1999).

No entanto, a eficácia destes produtos em proporcionar a redução do inchamento em espessura de painéis aglomerados foi comprovada por BAILEYS et al. (2003). Partículas comerciais, utilizadas para produção de OSB, foram tratadas com repelente de água em diversas proporções. Os painéis produzidos com material tratado obtiveram IE na ordem de 8%, o equivalente a 1/3 dos valores obtidos em

painéis com partículas não tratadas. A absorção de água também foi bastante reduzida.

Um dos principais repelentes de água empregado na indústria de painéis é a parafina. Muitos autores têm demonstrado que a adição de parafina em painéis aglomerados de fato pode melhorar a sua estabilidade dimensional (MENDES, 2001; KELLY, 1977; MOSLEMI, 1974).

2.2.2 Tratamento da Madeira

Quando o hidrogênio da água se liga aos grupos hidroxila da parede celular, que estão disponíveis na celulose, hemicelulose e lignina, ocorre uma expansão da parede celular de forma a acomodar a molécula de água. Sendo assim, qualquer tratamento que reduza a tendência da madeira em atrair as moléculas de água, proporcionará uma redução da tendência ao inchamento (ROWELL e YOUNGS, 1981). Parece claro, então, que um tratamento eficiente terá que remover ou tornar indisponível esses grupos hidroxilas da parede celular da madeira para a que se reduza a sua higroscopicidade. Podem ser citados três tratamentos ou grupos de tratamentos que reduzem a higroscopicidade da madeira: aplicação de calor, modificação química e impregnação de resinas. A discussão nesse tópico será centrada apenas nos dois últimos tipos de tratamento, sendo a aplicação de calor abordada mais a frente em tópico específico.

2.2.2.1 Preenchimento

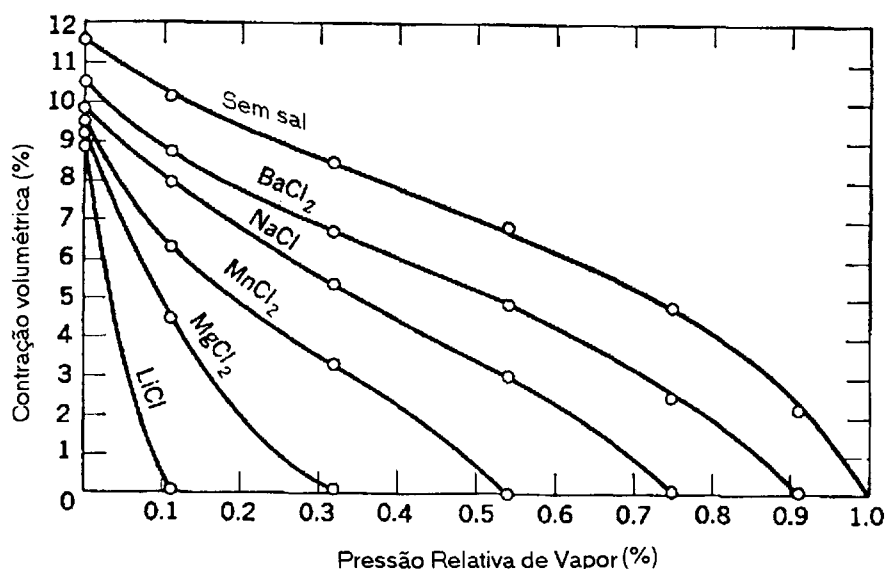
Esses tratamentos são aqueles onde produtos químicos se impregnam na parede celular úmida ou no lume, substituindo ou impedindo a movimentação de parte da água e são conhecidos em inglês como *bulking treatments*. Assim, quando a madeira é seca a presença desses produtos na parede celular evita parte da contração que normalmente ocorreria (WALKER, 1993). Esses tratamentos podem

ser divididos em três classes: lixiviável em água e não-aderido, não lixiviável em água e não-aderido, e não lixiviável e aderido (ROWELL e YOUNGS, 1981). Nesse item serão abordadas as duas primeiras classes de tratamento, enquanto que o tratamento não lixiviável e aderido será abordado no próximo item.

A eficiência desses tratamentos está diretamente relacionada ao grau de retenção do produto na madeira, e geralmente quanto maior é a retenção mais eficiente é o tratamento. A retenção dos produtos provoca um ganho de massa (GM). O tratamento lixiviável e não aderido diz respeito à aplicação de produtos que não aderem firmemente à parede celular que são solúveis em água, tais como sais e açúcares. Entre os sais podem-se citar soluções de magnésio, sódio, bário e lítio, bem como soluções de glucose, frutose (ROWELL e YOUNGS, 1981). Entretanto, como são altamente solúveis em água são facilmente lixiviáveis, o que torna necessário o recobrimento da madeira com vernizes logo após o tratamento para que evite o seu contato direto com a água (STAMM, 1964).

A contração da madeira contendo soluções aquosas de sais é menor do que a madeira que contem apenas água. Sendo assim, a madeira contendo sais solúveis tem menos água, estando sujeita a menor contração quando a água é evaporada (Figura 8).

FIGURA 8 - CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DO SAL UTILIZADO.



FONTE: STAMM (1964).

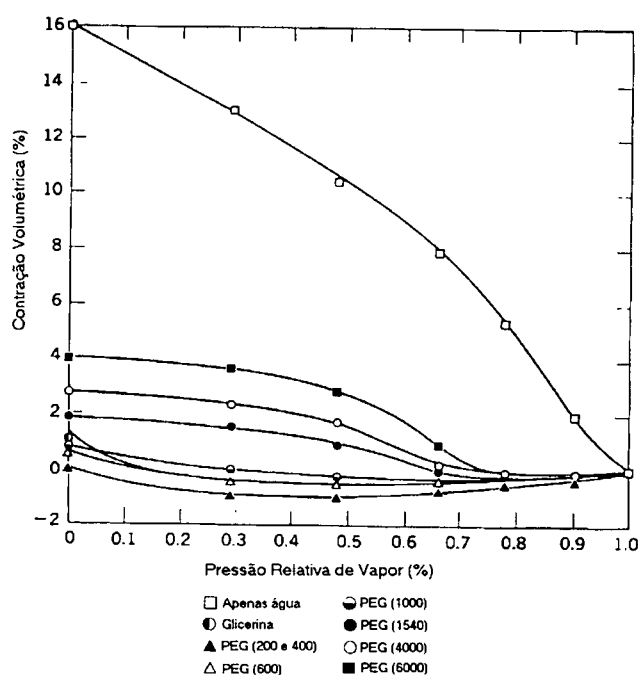
A Figura 8 apresenta a contração volumétrica da madeira contendo diversos tipos de sais. A contração da madeira só ocorrerá a partir do momento em que a pressão relativa de vapor for inferior ao equilíbrio proporcionado pela solução salina. Nota-se que na madeira que não contem sal a contração volumétrica ocorre a partir do momento em que a URA (pressão relativa de vapor) é igual ou inferior a 100%. Para o cloreto de lítio (LiCl) a contração da madeira ocorre apenas quando a pressão relativa de vapor for igual a 11%. A pressão relativa de vapor a qual a contração inicia é uma propriedade do sal e não propriamente da madeira. Quanto maior for a concentração do sal na solução, maior a deposição na parede celular quando a madeira iniciar a sua contração. Essa deposição de sais na parede celular é chamada de preenchimento e reduz a contração na proporção do seu volume depositado.

STAMM (1964) explica que quando o sal penetra a parede celular a sua concentração chega praticamente ao mesmo nível da concentração da solução. Quando a madeira é seca a água é primeiramente retirada da estrutura capilar e assim a concentração do sal é aumentada. Sendo assim, o sal tende a difundir para

dentro da parede celular de modo a equilibrar a concentração, entre as duas regiões (parede celular e vasos). Em seguida a água higroscópica é removida deixando o sal não volátil depositado na parede celular. Por esse motivo, a contração é reduzida proporcionalmente ao volume parcial ocupado pela massa de sal depositada na parede celular no momento em que a água higroscópica começa a evaporar. Entretanto, segundo STAMM (1964) os sais não são muito práticos para melhorar a estabilidade dimensional da madeira por que causa a corrosão de ferramentas e de conexões metálicas utilizadas em estruturas, podendo ocorrer também redução pronunciada da resistência mecânica.

Outro produto utilizado para o preenchimento da parede celular de madeira com o objetivo de melhorar a sua estabilidade dimensional é o polietileno glicol (PEG), e este talvez seja o produto mais bem conhecido para esse fim (WALKER, 1993).

FIGURA 9 - CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DO PESO MOLECULAR DO PEG.



FONTE: STAMM (1964).

Com peso molecular (PM) de 1000 é um plástico sólido altamente solúvel em água. A Figura 9 apresenta a contração volumétrica de Sitka spruce quando saturada por uma série de PEG de diferentes PM e também por glicerina. Fica evidente que PEG a PM de 1.000 ou menor é um excelente agente de preenchimento quando comparado com sais e açúcares. Quanto menor for PM mais solúvel é o PEG, ocupando assim os sítios que normalmente estariam ocupados pela água e assim proporcionando uma redução da contração próxima a 100%. (STAMM, 1964). Segundo WALKER (1993) a escolha do PM deve levar em consideração dois aspectos: baixo PM, o PEG torna-se solúvel, a madeira fica umedecida e o polímero pode realmente lixiviar; e alto PM, o PEG é muito menos solúvel em água, reduzindo sua capacidade de penetrar na parede celular tornando-se menos eficaz.

A madeira estabilizada com PEG é conhecida comercialmente como Carbowax (USDA, 1999). A madeira para receber o PEG deve estar saturada, uma vez que o tratamento se dá por difusão. Deste modo, a madeira é imersa na solução de PEG por um período que está em função da sua espessura podendo levar até semanas (USDA, 1999). Após esse período procede-se a secagem da madeira.

Entretanto, o tratamento com pressão também pode ser utilizado, como feito por PAZ e SANABRIA (2000). Os autores trataram a madeira de quebracho-branco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) com PEG 300 e 600 através do método Bethell, conhecido também como célula cheia e utilizado na impregnação de madeira. Os melhores resultados foram alcançados com a solução de PEG 600 a 50%, aplicada a pressão de 12 kg/cm² por duas horas e uma retenção de 73,7 kg/m³. ROWELL e YOUNGS (1981) citam redução do inchamento de 80% para retenção de 45% em relação ao peso da madeira e afirmam que as propriedades mecânicas da madeira são praticamente as mesmas da madeira não tratada.

A madeira tratada com PEG torna-se altamente umectante com URA acima de 60%, e em função disso faz-se necessária a seu revestimento com vernizes poliuretanos (USDA, 1999). Além da redução da contração da madeira o PEG tem sido utilizado para a redução das rachaduras superficiais que ocorrem durante a secagem em espécies de madeira susceptíveis. Para esse fim basta apenas uma penetração superficial do produto.

Nos últimos anos a utilização de PEG tem sido incrementada na área de conservação de madeira de embarcações submersas (HOFFMANN 1988; 1990). Quando essas embarcações são resgatadas do fundo do mar faz-se necessária a sua secagem para impedir a sua deterioração. A utilização de PEG reduz bastante as distorções e rachaduras que normalmente aconteceriam se a madeira não fosse tratada (USDA, 1999). WALKER (1993) cita o tratamento do navio sueco *Sava* que demorou quase 20 anos para ser completado e reconstruído. As peças maiores do navio passaram até 17 anos imersos em PEG para completarem totalmente o tratamento. Entretanto, como são altamente solúveis em água são facilmente lixiviáveis, o que torna necessário o recobrimento da madeira com vernizes logo após o tratamento para que evite o seu contato direto com a água (STAMM, 1964).

Outro tipo de tratamento por preenchimento é com produtos químicos que não aderem à parede celular, mas formam polímeros insolúveis em água que não são lixiviáveis (ROWELL e YOUNGS, 1981). Os produtos empregados com mais sucesso são as soluções aquosas de resinas a base de fenol-formaldeído (USDA, 1999), que parcialmente polimerizadas podem ser empregadas na estabilização dimensional permanente de madeira laminada. O tratamento é usualmente limitado a lâminas de espessura inferior a 8 mm, uma vez que o tempo para difusão aumenta consideravelmente com o aumento da espessura, embora material mais espesso possa ser tratado (USDA, 1999; WALKER, 1993).

Lâminas úmidas de 0,8 mm de espessura podem ser tratadas em imersão por 1 ou 2 horas, enquanto que uma lâmina de 3,2 mm de espessura necessita de quase 1 dia. A madeira saturada é imersa na solução e a resina se difunde para parede celular. A seguir a madeira é seca em condições moderadas e então aquecida em altas temperaturas para polimerizar (curar) a resina. O tratamento da madeira seca também pode ser feito, mas deve ser sob pressão. Após o seu tratamento, a madeira é colocada por 1 a 2 dias em condições que não permitam sua secagem, para uniformizar a distribuição da resina pela peça (USDA, 1999).

A reação de cura da resina é do tipo condensação, ou seja, forma moléculas de água que são removidas dentre os monômeros, dando lugar a formação de polímeros de alto peso molecular (PM). WALKER (1993) cita que GM da madeira de 35% propicia uma redução do inchamento de 70 a 75%. A madeira tratada com resina fenólica recebe o nome comercial de Impreg (USDA, 1999).

Quando a madeira tratada com resina fenólica é comprimida antes da cura da resina, produz-se um material conhecido comercialmente como Compreg (ROWELL e YOUNGS, 1981). A resina age como um agente amolecedor da madeira que é então comprimida sob pressão ($6,9 \text{ MPa} \cong 69 \text{ kgf/cm}^2$) e temperatura de 150°C até a densidade de $1,35 \text{ g/cm}^3$ (USDA, 1999; ROWELL e YOUNGS, 1981). Em ensaio de imersão em água por 24 horas o Compreg tem uma eficiência NA redução do inchamento de 95% e a absorção de umidade até o inchamento total de uma peça de 25 mm não se completa em menos de 1 ano.

Um outro tratamento não lixiviável e não aderido muito interessante que tem sido pesquisado é a substituição da água higroscópica por cera. Através um processo em duas fases a água pode ser removida da madeira se essa for, inicialmente, fervida em um solvente orgânico de ponto de ebulição maior que da água, como, por exemplo, etileno glicol monoetil éter (Cellosolve), cujo ponto de ebulição é de 135°C . A água da madeira é substituída pelo glicol, provocando um pequeno inchamento. Em seguida, o glicol pode ser substituído por uma cera

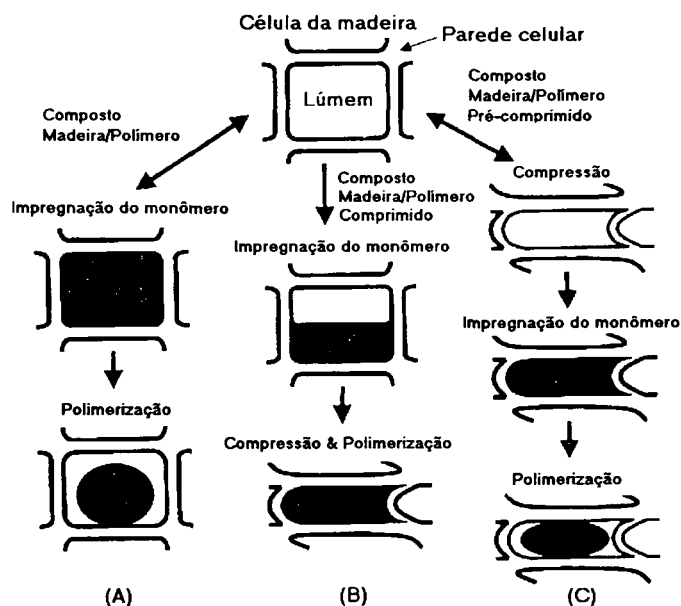
fundida, cujo ponto de ebulição é superior ao do Cellosolve. Em função do seu PM a cera não é capaz de substituir todos os sítios potenciais onde a água interage com a parede celular, entretanto, é possível uma substituição de 80% da água higroscópica inicialmente presente na madeira (ROWELL e YOUNGS, 1981). Segundo esses autores redução do inchamento de 80% pode ser obtido com esse método.

Os tratamentos abordados nesse item preenchem a parede celular com produtos que após sua polimerização e ou deposição não são lixiviados. Entretanto, existe outro tipo de tratamento onde o produto é depositado no lume das células dificultando a difusão da água líquida ou do vapor. Dentre esse produtos os mais utilizados são os monômeros de vinil.

A madeira é impregnada, utilizando-se vácuo, e o produto é depositado nos lumes das células. Em seguida é feita polimerização empregando radiação gama ou catalisadores ativados por calor (Figura 10). Desse modo, o polímero formado se deposita quase que exclusivamente nos lumes, dando origem a um produto composto madeira-polímero. Um monômero comumente utilizado é o metil metacrilato (MMA) que após a polimerização é convertido em polimetil metacrilato. (USDA, 1999).

Como o polímero é depositado no lume da célula, e não nas paredes, a higroscopicidade da madeira não é alterada. Com a eliminação desse importante caminho de água e de vapor, a madeira passa a responder muito lentamente às mudanças climáticas e assim a sua resistência à umidade é incrementada (USDA, 1999). Existe ainda dois outros processos de produção de compósitos madeira-polímero como também pode ser observado na Figura 10.

FIGURA 10 - PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO COMPÓSITO MADEIRA-POLÍMERO.



FONTE: YALINKILIC ET AL. (1999).

Assim a polimerização pode ser feita conjuntamente à compressão, enquanto que em outro a madeira é primeiramente aquecida comprimida para em seguida ser impregnada, e em seguida o composto é polimerizado. YALINKILIC et al. (1999) estudaram os processos que empregam compressão, apresentados na Figura 10.

2.2.2.2 Modificação Química

Através de reações químicas é possível substituir os grupos hidroxila presentes nos componentes da parede celular por um composto orgânico, proporcionando a modificação química da madeira o que reduz a sua higroscopicidade. Ocorre preenchimento da parede celular, através da adesão permanente do composto orgânico (ROWELL e YOUNGS, 1981), ou seja, é um tratamento do tipo não lixiviável e aderido. Os melhores resultados são obtidos quando se utiliza compostos que são capazes de reagir com os grupos hidroxila da madeira em condições neutras ou levemente alcalinas em temperaturas inferiores a

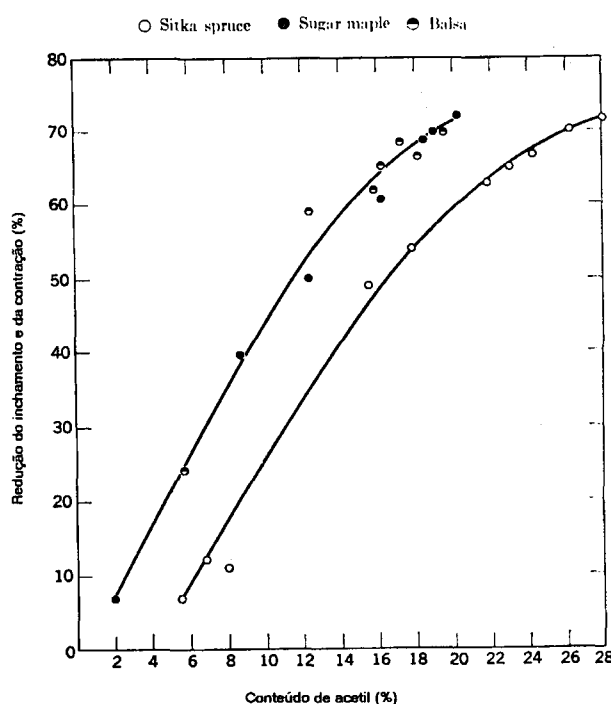
120°C. Além disso deve ser capaz de prover um inchamento da estrutura da madeira de modo a melhorar a penetração e também deve reagir rapidamente com os componentes da madeira produzindo ligações químicas estáveis.

Entre esses compostos os mais utilizados são os anidridos, isocianatos, epóxis, ácidos carboxílicos, lactona, cloreto de acila e nitrilas que propiciam redução do inchamento de 70 a 75% com GM de 20 a 30% (USDA, 1999). Os tratamentos da madeira e seus produtos com compostos anidridos recebem o nome genérico de esterificação, em função do tipo de ligação (éster) que formam com a madeira, enquanto que os tratamentos com epóxis, acilas e nitrilas recebem o nome eterificação (NORIMOTO e GRIL, 1993).

Dentre os compostos anidridos, o anidrido acético é dos mais empregados, dando origem a um tratamento chamado de acetilação. O conceito envolve a substituição dos grupos hidroxila da parede celular por grupos acetil muito menos higroscópicos, o que provoca um aumento do volume seco da madeira (STAMM, 1964).

O tratamento preenche a parede celular, onde os grupos acetil ficam aderidos permanentemente (USDA, 1999). A Figura 11 mostra que quanto maior o grau de acetilação maior é a redução da contração e do inchamento da madeira. STAMM (1964) afirma que GM de 20% propicia redução do inchamento em até 70%.

FIGURA 11 - REDUÇÃO DO INCHAMENTO E CONTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO GRAU DE ACETILAÇÃO.



FONTE: STAMM (1964).

A acetilação foi utilizada por OKINO et al. (1997) com o objetivo de melhorar a estabilidade dimensional de painéis aglomerados de bagaço de cana. Os autores avaliaram também o efeito da acetilação sobre as propriedades mecânicas. Os resultados das propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos com 2 níveis (12 e 8%) de resina à base de uréia-formaldeído são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGLOMERADO DE BAGAÇO DE CANA MODIFICADO QUIMICAMENTE POR ACETILAÇÃO.

TRATAMENTO ⁽¹⁾	ABS (%) ⁽²⁾	IE (%) ⁽²⁾	MOR	MOE	LI
			kgf/cm ²		
UF-12 A	52,7a ⁽³⁾	7,9a	131b	19.000ab	3,8ab
UF -12 C	94,1c	38,1c	176a	22.000a	4,7a
UF -8 A	68,5b	12,9b	97c	14.000c	2,8b
UF -8 C	103,5d	55,3d	130b	16.000bd	2,7b

FONTE: OKINO ET AL. (1997).

(1) A: acetilado, C: não acetilado;

(2) Em 24 horas;

(3) Médias seguidas por letras iguais não se diferem estatisticamente ao nível de $\alpha = 0,05$.

A redução da absorção de água (ABS) e do IE é muito pronunciada quando o bagaço é modificado quimicamente pela acetilação (A) em comparação ao bagaço não-tratado (C). Outro aspecto relevante é que o aumento da porcentagem de resina de 8% para 12% também tem um efeito benéfico sobre a estabilidade dimensional do painel. Essa, é também uma outra forma de melhorar a estabilidade dimensional de painéis.

Entretanto, a acetilação provocou redução, estatisticamente significativa, do MOR, MOE e LI o que é, sem dúvida, uma desvantagem do tratamento. De fato, STAMM (1964) chama a atenção para a redução de 27 a 42% do MOR em flexão de madeira acetilada. Outra desvantagem apresentada pelo autor é a capacidade do anidrido acético em corroer aço e ferro, embora a acetilação aumente a resistência de painéis a organismos xilófagos como observado por OKINO et al. (1998).

HOUTS et al. (2003) produziram painéis estruturais com diferentes proporções (100-0%) de partículas acetiladas. Os painéis produzidos com 50% de partículas acetiladas obtiveram o menor valor de IE: 17,6% na borda, e 12,9% na superfície. A acetilação foi bastante deletéria para a ligação interna de painéis produzidos inteiramente com partículas acetiladas.

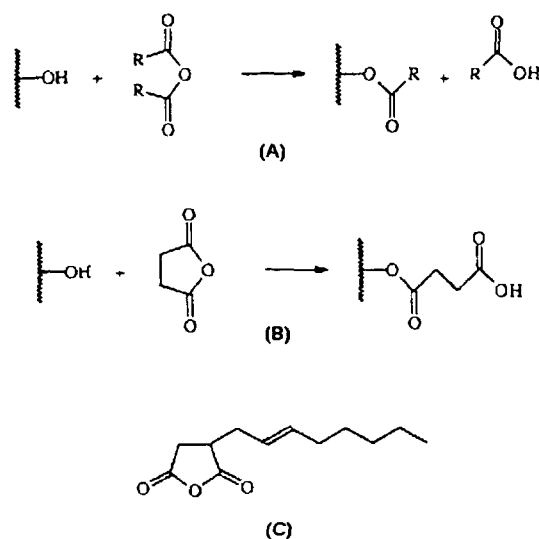
Outros compostos anidridos também podem ser utilizados para promover a modificação química da madeira. Sendo assim, HILL e MALLON (1999) avaliaram o anidrido succínico (AS) e anidrido succínico octenil (OSA) para a estabilização dimensional de scots pine (*Pinus sylvestris*). As amostras foram previamente impregnadas com piridina antes da aplicação da solução dos anidridos. Os autores estudaram o efeito de vários níveis de retenção (ganho de massa) e do ciclo (imersão/secagem) sobre a redução do inchamento.

Os resultados indicaram que a partir do 2º ciclo ocorre aumento da estabilidade dimensional da madeira tratada, e que o OSA produz uma madeira mais estável que AS. Para ambos os compostos, o aumento da retenção do produto tornou a madeira mais estável, enquanto aumento do número de ciclos reduziu a

eficiência do tratamento. Segundo os autores a melhoria proporcionada pelo OSA ocorre através de um mecanismo ainda não identificado.

Deve-se salientar que o tratamento de acetilação proporciona fixação dos grupos acetil de forma que esses não sejam lixiviados em condições ambientais normais. No entanto, as ligações éster (Figura 12), responsáveis pela ligação dos grupos acetil com a madeira, são hidrolisadas quando amostras de madeira acetilada são submetidas a ciclos de imersão em água e secagem causando lixiviação dos grupos acetil. (HILL e MALLON, 1999; STAMM, 1964).

FIGURA 12 - REAÇÃO DE UM ANIDRIDO COM A MADEIRA.

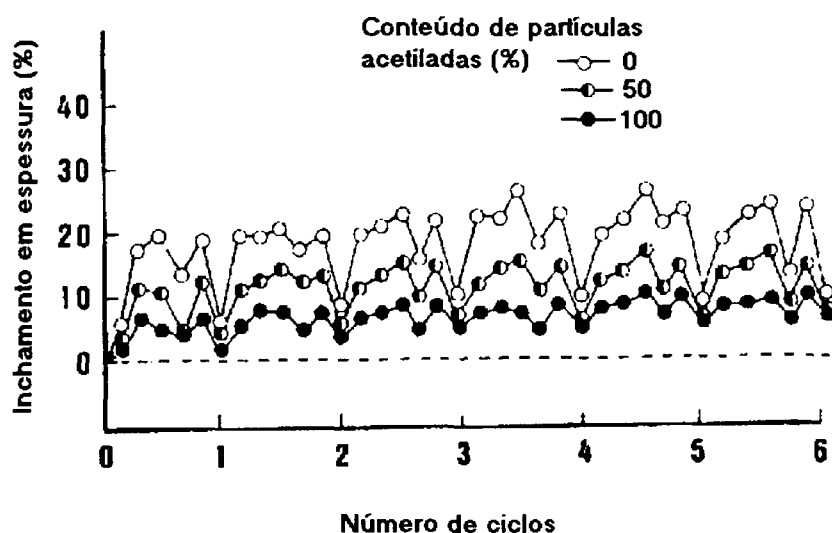


FONTE: HILL E MALLON (1999).

Por esse motivo a madeira acetilada é submetida a diversos ciclos de intemperismo (imersão/ secagem; exposição prolongada a altas URA, para se avaliar o grau de fixação dos grupos acetil. Esses ciclos simulam o envelhecimento da amostra com o passar do tempo. STAMM (1964) cita trabalho em que madeira acetilada foi exposta a UR de 30% a 90% e temperatura de 26°C durante meses, o que não acarretou a perda da estabilidade dimensional. Segundo o autor, a desacetilação deve ser mínima, mesmo frente a condições severas de exposição da madeira tratada. KAJITA e IMAMURA (1993), em sua revisão, apresentam resultados do efeito do número de ciclos de intemperismo sobre a estabilidade

dimensional de painéis aglomerados de seraya (*Shorea* sp.) com diferentes conteúdos de partículas acetiladas. Utilizou-se o ensaio de envelhecimento acelerado de 6 ciclos da ASTM. A Figura 13 ilustra os resultados para o IE.

FIGURA 13 - EFEITO DOS CICLOS DE ENVELHECIMENTO SOBRE O INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS AGLOMERADOS.



FONTE: KAJITA E IMAMURA (1993).

Pode-se observar que o aumento da proporção de partículas acetiladas promove redução do IE do painel. O número de ciclos não teve grande efeito e apenas aumentou levemente o IE em todas as proporções estudadas. O que tudo indica, é que a modificação química através de anidridos proporciona uma estabilização dimensional duradoura, mesmo sobre condições de uso mais severas. De fato, HILL e MALLON (1999) observaram a lixiviação de OSA e AS e argumentam que a redução da eficiência do tratamento não pode ser atribuída totalmente a esse fato.

2.2.2.3 Entrelaçamento

Os tratamentos que foram abordados no item anterior são aqueles em que ocorre o preenchimento da parede celular por um determinado composto, resultando num ganho de massa de 15 a 30% o que proporciona uma redução do inchamento

de no mínimo 50%. Quando se afirma GM de 15 a 30% significa que para cada quilo de madeira seca a ser tratada, são consumidos de 150 a 300 g de composto, o que é um consumo relativamente alto. Esses aspectos determinaram a busca de um método que apresentasse boa eficiência, mas com menor consumo de compostos químicos, isto é, menor GM por parte da madeira (STAMM, 1964).

Assim surgiu o tratamento chamado de *cross-linking*, onde os grupos hidroxila da parede celular são interligados através de pontes de metileno ($-\text{CH}_2-$), indisponibilizando esses sítios para a formação de ligações com as moléculas de água. Desse modo uma boa estabilização dimensional pode ser obtida (redução do inchamento de 50% a 75%) com um pequeno GM, algo em torno de 4% (WALKER, 1993).

Um dos produtos mais empregados é o formaldeído que na presença de catalisadores ácidos age como um agente de interligação, fornecendo as pontes de metileno. A reação do formaldeído com a madeira (ROWELL e YOUNGS, 1981) é apresentada abaixo:



Essa reação só ocorre quando a madeira é seca e assim o seu tratamento é feito através do vapor de formaldeído que é obtido a partir do aquecimento do paraformaldeído em altas temperaturas e na presença de um ácido forte. (WALKER, 1993; STAMM, 1964). A madeira tratada com formaldeído torna-se quebradiça, ou seja, perde elasticidade. Além disso, pode ocorrer uma redução acentuada da sua tenacidade, de sua resistência a abrasão e ao impacto (ROWELL e YOUNGS, 1981; STAMM, 1964). A perda da resistência mecânica ocorre em função da hidrólise das hemiceluloses em conjunto com depolimerização da celulose, enquanto que a perda de elasticidade ocorre pela formação das ligações do tipo $-\text{O}-\text{C}-\text{O}-$ que são curtas e pouco flexíveis.

KOLLMANN et al. (1975) afirma que madeira sujeita às mesmas condições de tratamento, ou seja, alta temperatura na presença de catalisadores ácidos, mas sem o formaldeído apresentam a mesma redução de resistência. Entretanto, a melhoria da flexibilidade da madeira pode ser obtida com a utilização de compostos orgânicos de cadeia mais longa, tais como isocianatos e epóxios, com 4 a 10 carbonos (ROWELL e YOUNGS, 1981).

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA E DE SEUS SUBPRODUTOS

O tratamento térmico é bastante empregado na indústria para o processamento de produtos florestais. Na indústria de compensados é utilizado para tratar toras e reduzir a resistência à laminação; na secagem para reduzir o conteúdo de umidade da madeira; na produção de barris na vinicultura, no relaxamento de tensões internas de toras (NOGI et al. 2003) entre outras inúmeras aplicações. Também tem sido empregado com o objetivo de alterar permanentemente determinadas características da madeira como será visto adiante. Neste sentido, na atualidade há disponíveis na Europa, em escala industrial, cinco tipos de tratamentos térmicos, produzindo anualmente 165.000 m³ de madeira tratada termicamente (MILITZ, 2002; WELZBACHER e RAPP, 2002).

Sabidamente o tratamento térmico pode implicar em modificações desejadas, e indesejadas. Existem várias formas de aplicar o tratamento térmico na madeira e em seus produtos, as quais implicam em diferentes níveis de alteração de suas propriedades. O meio de tratamento pode ser ar, fumaça, vapor, vapor supersaturado, nitrogênio entre outros. A forma de aplicar e o equipamento utilizado podem ser autoclave, estufa, túnel de aquecimento e prensa, entre outros. O teor de umidade da madeira pode variar de seca, no caso da retificação térmica, a úmida, no caso da secagem a alta temperatura. Sendo assim, com os trabalhos revisados e que serão apresentados, objetiva-se cobrir toda essa variedade de possibilidades, de forma a proporcionar maior entendimento de todo o processo de tratamento

térmico da madeira e de seus produtos. No entanto, como o objetivo do presente trabalho é o pós-tratamento térmico de painéis OSB, será dada prioridade aos efeitos do tratamento nessas condições, ou seja, aquecimento da madeira seca em atmosfera inerte.

Serão apresentadas as principais formas de tratamento térmico e seus efeitos sobre as características da madeira e de painéis de madeira. Os painéis de partículas orientadas fazem parte de um conjunto de materiais chamados genericamente de painéis compósitos porque é a junção de diferentes materiais compondo um painel cujo desempenho estará em função da natureza individual dos materiais que o formam. Assim, o OSB é composto de madeira, resina e uma pequena parte de parafina. No tratamento térmico do OSB, a madeira, a resina e a parafina estão sujeitas a algum grau de alteração que no conjunto influenciarão as propriedades finais dos painéis. Dentre esses três materiais que compõem o OSB, a madeira é a mais estudada com relação à alteração de suas características sob a ação do calor. Por representar a maior parte do painel (85-90% do volume) suas alterações serão mais profundamente analisada na presente revisão.

2.3.1 Alterações nas Propriedades Físicas e Mecânicas

De acordo com WANGAARD (1950) as alterações nas propriedades elásticas e de resistência da madeira podem ser classificadas em temporárias ou permanentes. As temporárias são aquelas que existem apenas enquanto a madeira está sob a ação da temperatura e são independentes do tempo de exposição. Por outro lado, as permanentes são aquelas alterações que permanecem mesmo após a madeira ter voltado à temperatura ambiente, sendo dependentes da temperatura aplicada e do tempo de exposição.

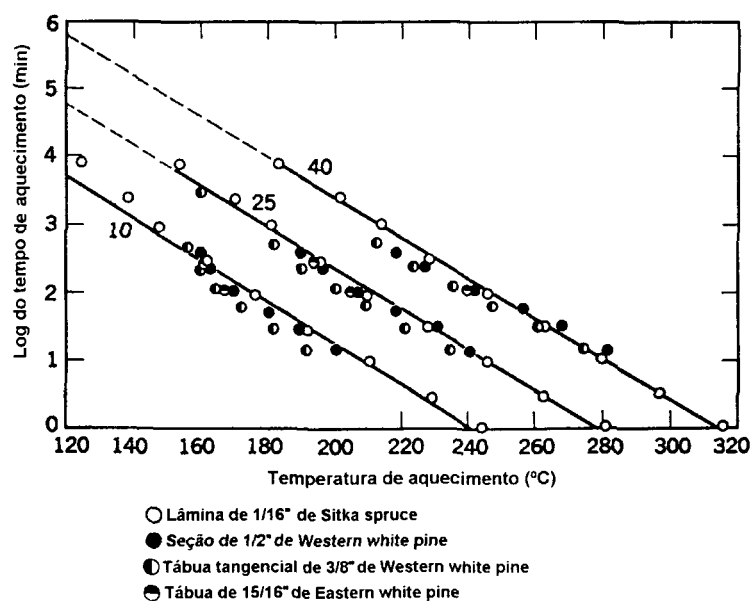
Deste modo, quando a madeira é ensaiada variando-se sua temperatura, apresenta uma redução pronunciada de suas propriedades mecânicas. Essa redução é maior quanto mais elevada for a temperatura devido à maior expansão

térmica da armação cristalina da celulose e também ao aumento da intensidade de oscilação das moléculas provocada pelo calor (KOLLMANN e CÔTÉ JR., 1968). Segundo BROWN et al. (1952) o ensaio da madeira em diferentes temperaturas é algo muito complicado, uma vez que a madeira estará sujeita também às tensões impostas pela perda de umidade concomitantemente à aplicação de calor. Essas, então, são as alterações temporárias e não é o objeto de estudo da presente tese.

Por outro lado, a madeira pode ser aquecida sob determinadas condições de temperatura, tempo, pressão e umidade de modo a prover alterações ditas permanentes. Nessas condições a madeira termicamente tratada pode apresentar alteração de propriedades mecânicas, da estabilidade dimensional e da resistência biológica. Essas alterações são provocadas principalmente em função da degradação térmica dos componentes químicos da madeira e também pela mudança de suas estruturas químicas. Podem ocorrer também alterações na morfologia dos componentes anatômicos.

Quando a madeira é aquecida em condições de tempo e temperatura que causam a degradação (hidrólise) das hemiceluloses, que compõem a parede celular, tem-se uma redução da sua higroscopicidade. As hemiceluloses são os componentes mais susceptíveis à degradação térmica e é o polímero mais higroscópico da parede celular (ROWELL e YOUNGS, 1981). Segundo STAMM (1964) o quadrado da redução do inchamento é proporcional à perda de peso. A Figura 14 apresenta a porcentagem de redução do inchamento em função do tempo e da temperatura de aquecimento, e observa-se que a utilização de temperaturas menores por tempo maiores produz a mesma redução do inchamento que em temperaturas maiores por menores períodos. Assim, para a redução do inchamento em 40% pode-se utilizar 320°C por 1 minuto ou 150°C por 1 semana.

FIGURA 14 - EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO SOBRE A ESTABILIDADE DIMENSIONAL.



FONTE: STAMM (1964)

A fundamentação teórica inicial afirmava que a água eliminada da parede celular daria lugar para a formação de ligações entre os grupos hidroxila das cadeias adjacentes de celulose. Entretanto, essa teoria foi derrubada quando se mostrou que o inchamento em piridina e em solução aquosa de hidróxido de sódio não é reduzido do mesmo modo como na água. Se as tais ligações tivessem sido formadas o inchamento deveria ser reduzido em todos os três meios testados. A teoria aceita hoje diz que a degradação térmica inicial da madeira proporciona a formação de polímeros de furfural, oriundos de açúcares degradados, que são menos higroscópicos (STAMM, 1964).

De um modo geral as propriedades mecânicas da madeira são negativamente afetadas pelo tratamento térmico, como estabeleceram vários autores (PANSIN e DE ZEEUW, 1970; KOLLMANN e CÔTÉ JR., 1968; STAMM, 1964; BROWN et al. 1952) e com poucas exceções suas propriedades elásticas e de resistência não são afetadas (BODIG e JAYNE, 1993).

Dentre as propriedades mecânicas da madeira sólida, a tenacidade e o trabalho na máxima carga na flexão estática são mais sensíveis aos efeitos indesejados da exposição da madeira a alta temperatura que o módulo de ruptura e módulo de elasticidade. (WANGAARD, 1950). A tenacidade inclusive é utilizada como um indicativo mais sensível da degradação térmica da madeira (CHISTIANSEN, 1997). Segundo STAMM (1964), as propriedades de trabalho e impacto (p ex. tenacidade) são as mais afetadas pelo tratamento térmico.

A secagem a alta temperatura ($>100^{\circ}\text{C}$) é bastante empregada na indústria de compensado, para secagem de lâminas e também na secagem de madeira serrada de maior espessura. Nessas condições (madeira úmida e ar quente) alguma alteração de suas propriedades pode ocorrer. Desse modo, KOZLIK (1974) avaliou o efeito da temperatura de secagem (176 , 316 e 426°C) e do meio de secagem (ar ou vapor) sobre o MOR e MOE de lâminas de douglas-fir e southern pine. Houve diferença de comportamento com relação à temperatura, mas no entanto nenhum padrão pode ser observado. Assim, em determinadas ocasiões o aumento da temperatura reduziu as propriedades, e em outras ocorreu o contrário. No entanto, o meio de secagem apresentou um padrão bem definido: o ar produziu lâminas com menores valores de MOR e MOE em ambas as espécies em comparação ao vapor.

CHISTIANSEN (1997) avaliou o efeito da secagem excessiva sobre a tenacidade de lâminas de yellow-poplar. As peças foram secas em três níveis de temperatura (170 , 195 e 220°C) com tempo variável de 26 a 224 minutos. Os resultados apontaram para uma redução da tenacidade com o aumento do tempo de secagem, embora essa redução tenha sido mais acelerada quando se utilizou a temperatura de 220°C . O autor explica que a hemicelulose é o polímero mais susceptível a degradação térmica e que este tem grande influência sobre a tenacidade. As alterações químicas e suas conseqüências serão discutidas em item próprio a seguir.

Recentemente, KALLANDER et al. (2001) estudaram a influência da temperatura de secagem sobre as propriedades de norway spruce. A madeira foi seca em duas diferentes temperaturas: 70 e 120°C. A primeira é bastante usual na secagem convencional, enquanto a segunda já está localizada na faixa da secagem a alta temperatura. A Tabela 2 apresenta os resultados para algumas propriedades avaliadas.

TABELA 2 - EFEITO DA TEMPERATURA DE SECAGEM NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA DE NORWAY SPRUCE.

PROPRIEDADE	TEMPERATURA (°C)	
	70	120
Flexão		
MOE (GPa)	12,7	12,7
MOR (MPa)	47,5	45,0
Tração		
MOE (GPa)	12,4	12,6
Resistência (MPa)	32,4	28,6

FONTE: KALLANDER ET AL. (2001).

Fica evidente por essa Tabela que as propriedades de resistência tiveram uma pequena redução, enquanto as propriedades elásticas não foram afetadas. SEVERO et al. (2000) avaliaram o efeito da vaporização da tora e de peças úmidas de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii* sobre algumas de suas propriedades. As toras foram vaporizadas a 100°C durante 20 horas. Em seguida a prancha diametral foi novamente vaporizada por 3 horas. Não foi detectada influência da vaporização sobre a compressão perpendicular às fibras, mas ocorreu redução significativa para a compressão paralela e o cisalhamento tangencial e radial com a vaporização da tora e também para vaporização da tora seguida pela da prancha.

Vários trabalhos sobre tratamento térmico em condições distintas (atmosfera inerte, madeira seca) de madeira seca apontaram para o menor efeito da temperatura sobre as propriedades elásticas em comparação às de resistência. Esses trabalhos serão analisados a seguir.

A aplicação de calor em madeira seca e produtos acabados é objeto de vários estudos. Nesse tipo de tratamento a madeira já foi seca e alguma alteração em função disso pode ter ocorrido. O objetivo da aplicação de calor, nesse caso, é modificar o comportamento da madeira já processada, permitindo um melhor desempenho quando em utilização. Esse tipo de tratamento é conhecido como retificação térmica e vem sendo pesquisado e desenvolvido principalmente por pesquisadores e instituições francesas e finlandesas.

VITAL e DELLA LUCIA (1982) estudaram o efeito do tratamento térmico sobre a estabilidade dimensional e higroscopicidade da madeira de *Eucalyptus saligna*. Foram empregadas temperaturas de 105 a 155°C, durante 10 a 160 horas, em estufa. Ocorreu a redução do TUE e dos inchamentos tangencial e radial, com o aumento do tempo e da temperatura do tratamento. Os autores explicam que a redução de TUE foi, possivelmente, motivada pela redução do número de sítios de adsorção para as moléculas de água, pela formação de pontes de hidrogênio, ou ainda pela degradação desses sítios.

Em trabalho subsequente (VITAL et al. 1983) foram avaliadas as propriedades mecânicas. Os resultados mostraram que as propriedades são afetadas diferentemente de acordo com a temperatura de tratamento: a 105°C o MOR, trabalho total e cisalhamento foram afetados negativamente; a 130°C apenas MOE e compressão paralela não foram afetados; mas a 155°C todas as propriedades foram afetadas. Entretanto, os autores identificaram que em algumas ocasiões (130 e 155°C, por 20 h.) ocorreu aumento do trabalho e da tensão, ambos no limite proporcional.

KIM et al. (1998) empregaram o tratamento térmico para madeira de *Pinus radiata*. Os autores avaliaram o efeito sobre as propriedades de flexão: módulo de elasticidade, tensão de ruptura e trabalho na carga máxima. O tratamento reduziu as propriedades avaliadas a taxas que estavam altamente relacionadas às condições de tratamento (tempo e temperatura). No entanto, o trabalho à carga máxima foi a

propriedade mais afetada, enquanto MOE sofreu a redução menos acentuada. Por outro lado SANTOS (2000) tratou madeira de *E. globulus* a 180°C por 3 horas e observou um ligeiro aumento do MOE em comparação com a madeira não tratada. Entretanto a resistência à tração perpendicular foi reduzida em 26%.

MATSUMOTO et al. (2001) trataram termicamente madeira de spruce (*Picea* sp.) entre 40 e 200°C por períodos de 8 a 72 horas. Os resultados mostraram que o MOE não é afetado na faixa até 160°C, no entanto MOR e módulo Janka (chamado também de tenacidade por outros autores) são afetados a partir de 120°C. Dentre essas propriedades a mais afetada foi o módulo Janka, seguido do MOR e depois MOE.

A fumigação é um método que vem sendo bastante estudado principalmente por pesquisadores e instituições japonesas. Consiste em submeter a madeira, seja em tora ou serrada a ação direta da fumaça liberada pela queima de resíduos ou do ar quente de uma chama. É usualmente um método onde a temperatura é inferior a 100°C, e desse modo não ocorrem grandes alterações das propriedades mecânicas. ISHIGURI et al. (2001a) aplicaram essa metodologia em madeira de sugi (*Cryptomeria japonica*). O tratamento foi controlado de modo a gerar temperaturas de 65 a 85°C e aplicado de 1 a 4 dias. Em nenhum dos tratamentos avaliados ocorreu a redução do módulo de Young, embora tenha ocorrido uma pequena redução da densidade.

Esses mesmos autores (ISHIGURI et al. 2001b) aplicaram esse tipo de tratamento em 6 espécies de coníferas japonesas durante 200 horas a 75°C. Praticamente não ocorreu redução de MOR, MOE e energia absorvida na flexão estática. Por outro lado, NOGI et al. (2003) aplicaram a fumigação para o relaxamento de tensões internas de crescimento em toras de japonese cedar (*Cryptomeria japonica*). Os autores observaram relaxamento das tensões a 80°C por 33 horas, o mesmo não ocorrendo em temperatura menor e tempo maior.

A compreensão da estabilidade dimensional de produtos a base de madeira tais como painéis também é objeto de vários estudos. A estabilidade dimensional de um painel pode ser avaliada em função da absorção de água, do inchamento em espessura e da expansão linear (EL) que ocorrem quando é imerso em água líquida ou exposto a condições ambientais controladas.

O emprego do tratamento térmico para a estabilização de painéis de madeira apresenta algumas variações. Assim, tem-se o pré ou o pós-tratamento. O pré-tratamento com vapor é usualmente empregado em partículas e fibras que posteriormente são utilizadas na produção dos painéis. É uma das áreas mais pesquisadas na atualidade, uma vez que seu emprego não limita o emprego da resina sendo assim uma opção para a melhoria da estabilidade dimensional de painéis fabricados com resinas uréia-formaldeído (UF) e melamina uréia-formaldeído (MUF). O pós-tratamento se refere a aplicação do calor após a produção do painel e é bastante utilizado principalmente pela indústria na melhoria das propriedades de painéis de fibra, embora seja possível o seu emprego na indústria de painéis aglomerados feito com resina fenol-formaldeído (FF) e isocianato (IC) (SEKINO et al. 1998). No entanto, o vapor não é o único meio para aplicação do tratamento, sendo possível emprego também sob condições de atmosfera inerte (ar quente). Esse tipo de tratamento também tem merecido grande atenção.

O tratamento térmico de painéis de fibra é utilizado pela indústria. O objetivo principal é aliviar as tensões de compressão e assim prover melhor estabilidade dimensional ao painel. A estabilização dimensional de painéis pode ser avaliada através do estudo da variação de sua espessura, comprimento e largura quando exposto a diferentes condições ambientais. Assim, IE e expansão linear (EL) são as principais variáveis para se caracterizar a estabilidade dimensional de um painel.

O IE é função de dois fatores: natureza higroscópica da madeira e tensões de compressão. A madeira é um material *naturalmente hidrófilo* e como tal absorve e adsorve moléculas de água no estado líquido e gasoso. Assim, quando a madeira é exposta a umidade ocorre aumento de suas dimensões, conhecido como inchamento, e quando a umidade é retirada ocorre redução das dimensões, ou seja, retração. O painel está então sujeito a essas variações oriundas do material do qual foi feito.

Além disso, durante a produção do painel é necessária a aplicação de pressão para prover o contato entre as partículas e consolidar o painel. O colchão de partículas é prensado até atingir a espessura final do painel o que significa reduzir sua altura de 5 a 8 vezes. Assim, após a consolidação do painel uma grande tensão de compressão está presente, forçando-o a retornar a espessura original do colchão. Esse movimento é conhecido como *springback* e é minimizado pela resistência oferecida pelas ligações adesivas formadas entre as partículas e pela rigidez da madeira. Quando o painel é umedecido ocorre a liberação dessas tensões de compressão que juntamente com o inchamento natural da madeira resulta em alteração das dimensões do painel, principalmente em espessura.

Diante desses fatos fica evidente que a melhoria da estabilidade dimensional de painéis aglomerados está diretamente relacionada com a redução das tensões de compressão e da higroscopicidade da madeira. Como visto anteriormente a madeira quando aquecida reduz sua rigidez sob a ação do calor, isso porque a madeira é um composto viscoelástico.

A viscoelasticidade é a característica apresentada por um material que pode exibir uma variação em suas propriedades desde fluídos viscosos a sólidos linearmente elásticos (vítreo), dependendo da temperatura, concentração do diluente e o tempo de ação da força. No estado vítreo de um polímero à baixa temperatura, caracteriza-se por apresentar alto módulo de ruptura e por fraturas do tipo quebradiça. Entretanto, estando em alta temperatura, esse polímero está em um

estado elástico e caracteriza-se por apresentar módulo de ruptura 3x menor e grandes deformações até a ruptura (WOLLCOTT et al., 1990).

Entre as condições associadas ao estado vítreo e ao elástico de um polímero tem-se um estado de transição, onde são observadas grandes mudanças em suas propriedades. Nessa região intermediária, as conseqüentes mudanças iniciam-se quando o polímero atinge uma determinada temperatura, chamada de temperatura de transição viscoelástica (T_g). Mecanicamente observa-se uma redução pronunciada da rigidez quando o polímero atinge T_g .

A madeira é um material formado por polímeros amorfos (lignina e hemiceluloses) que possuem essa característica, sendo assim exibe um comportamento viscoelástico. Como a lignina, localizada principalmente na lamela média, age como um "agente cimentante" entre as fibras, acredita-se que o seu comportamento viscoelástico tenha maior influência sobre a viscoelasticidade da madeira como um todo.

Quando está à temperatura ambiente, o painel comporta-se como um sólido - embora não seja linearmente elástico - e apresenta um determinado nível de rigidez. Essa rigidez impede que as tensões impostas durante a prensagem promovam deformações plásticas em sua estrutura após a consolidação, o que causaria alterações definitivas em suas dimensões. Além disso, as uniões coladas entre partículas desenvolvidas pelo adesivo, contribuem bastante para que essas deformações não ocorram.

Com o aumento da temperatura do painel - acima de T_g - a matriz formada pelos polímeros da madeira passa a apresentar menor resistência à deformação - torna-se menos rígida - permitindo que as tensões internas sejam liberadas ou minimizadas. No entanto, sob essas condições a liberação das tensões gera deformações elásticas, permitindo um rearranjo da matriz para um estado de menor tensão. Quando o painel retorna à temperatura ambiente, volta a apresentar a sua rigidez característica.

Diante do exposto, pode-se notar que a aplicação de qualquer tratamento térmico em painéis aglomerados (partículas, fibras, OSB) pode implicar em liberação das tensões de compressão. De fato, essa técnica é empregada industrialmente. SUCHSLAND e ENLOW (1968) avaliaram a estabilização dimensional de painéis através do tratamento térmico. Avaliou-se 2 temperaturas (176 e 218°C) e 3 tempos de tratamento (39, 60 e 120 minutos) sobre o IE de painéis aglomerados fenólicos. Os resultados mostraram que os aumentos de temperatura e tempo de tratamento reduzem o IE do painel. A redução de IE ocorreu em função do relaxamento das tensões de compressão proporcionado pela aplicação de calor.

HEEBINK e HEFTY (1969) estudaram a eficiência de 3 tratamentos sobre a estabilidade dimensional de painéis. Os tratamentos foram: vaporização dos painéis por 10 minutos a 182°C, ar quente em estufa a 218°C por 2 horas e pré-tratamento das partículas com vapor super aquecido a 182°C. A vaporização dos painéis a 182°C e o ar quente a 218°C foram igualmente efetivos na redução do IE dos painéis, embora o segundo tenha propiciado a secagem excessiva do painel. O pré-tratamento das partículas mostrou-se relativamente ineficiente. Contrariamente ao trabalho de HEEBINK e HEFTY (1969) o pré-tratamento de partículas e fibras tem apresentado bons resultados e pesquisas têm sido feitas na atualidade.

HSU et al. (1988) empregaram a pré-vaporização de partículas a 1,55 MPa durante distintos tempos e avaliaram as propriedades de painéis wafer. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 - PROPRIEDADES DE PAINÉIS FABRICADOS COM PARTÍCULAS PRÉ-VAPORIZADAS.

TEMPO (min.)	IE 24h (%)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	LI (kPa)
0 (Controle)	16	3.675	24,8	535
3,0	4	4.392	22,1	503
3,5	4	4.875	23,6	483
4,0	4	5.599	24,7	441
4,5	4	4.937	23,4	469

FONTE: HSU ET AL. (1988).

Analisando-se a Tabela 3 nota-se que o tratamento por 3 minutos reduz o IE em até 75% comparado com o controle. Entretanto, acima desse tempo não é observada uma redução maior de IE. Nota-se também que o tratamento impôs uma ligeira melhoria do MOE, não teve efeito pronunciado sobre o MOR, mas causou uma pequena redução da ligação interna (LI). A investigação dos mecanismos que estão envolvidos na melhoria da estabilidade dimensional de painéis produzidos com partículas vaporizadas foi feita por SEKINO et al. (1999). Os autores argumentam que essa melhoria é ocasionada pela redução do *springback* das partículas e pelo aumento da compressibilidade do material. Isso significa que a pré-vaporização das partículas reduz a tensão interna de compressão, imposta ao material, e consequentemente reduz os danos causados às ligações adesivas quando a pressão é retirada.

Recentemente, GOROYIAS e HALE (2002) avaliaram o pré-tratamento térmico de partículas empregadas na produção de painéis OSB. Foram avaliados sete temperaturas (200-260°C) e tempo de tratamento de 20 minutos. Os resultados apontaram que o IE das partículas foi reduzido gradativamente com o aumento da temperatura do tratamento, e MOR e nem MOE foram afetados.

Especificamente para a produção de painéis de fibra alguns trabalhos demonstram o efeito benéfico da pré-vaporização. ROWELL et al. (1995) trataram fibras de aspen em autoclave (200°C, 16kPa) durante 4 minutos. Os painéis produzidos com fibras pré-tratadas apresentaram IE muito inferior em comparação aos painéis feitos com fibras naturais.

O pós-tratamento de painéis aglomerado foi objeto de estudo de SHEN (1974). Painéis feitos com resina UF foram novamente prensados em temperaturas de 260 a 343°C, por 2 a 4 segundos, à pressão de 200 a 600 psi. Os resultados apontaram para um aumento da densidade da superfície, mesmo para esse curto período de tempo, passando de 0,8 para 1,2g/cm³. Além disso, não ocorreu qualquer alteração significativa no MOR e cisalhamento dos painéis.

ROFFAEL e RAUCH (1973) também avaliaram o efeito do pós-tratamento térmico sobre as propriedades de painéis aglomerados fabricados com resina isocianato. Os painéis produzidos foram subsequentemente tratados à 200°C por períodos de 15 a 60 minutos. Os resultados apontaram para uma redução pronunciada de IE e ABS, enquanto que por outro lado o MOR foi reduzido em até 20%.

BEECH (1975), em um dos trabalhos mais completos sobre o IE de painéis aglomerado, avaliou o efeito da vaporização sobre as propriedades destes painéis. Os painéis já produzidos foram vaporizados à pressão correspondente à 160°C, e em seguida foram avaliados com relação ao IE total, o IE reversível e a taxa de não-retorno em espessura (TNRE). Chamada também de IE não-reversível, a TNRE expressa o inchamento ocorrido em função da liberação das tensões de compressão, que uma vez liberadas pela umidade, não retornam (contraem) à situação anterior. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 - INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS AGLOMERADOS VAPORIZADOS.

TIPO PAINEL ⁽¹⁾	IE TOTAL (%)		TNRE (%)		IE REVERSÍVEL (%)	
	TESTE ⁽²⁾	VAPOR	TESTE	VAPOR	TESTE	VAPOR
1-9%	12,9	7,6	6,3	3,1	6,6	4,6
1-12%	8,5	6,5	3,3	1,5	5,7	5,0
2-9%	8,3	6,6	3,0	2,9	5,3	3,7
2-12%	6,5	5,4	1,6	1,8	4,8	3,6
3-9%	10,1	6,8	4,1	3,4	6,0	4,6
3-12%	7,2	6,5	1,8	2,1	5,4	4,1

FONTE: BEECH (1975).

(1) Tipo de partícula; % adesivo fenólico;

(2) Testemunha, não-tratado.

A vaporização dos painéis reduziu o IE total aos níveis de valores similares ou mesmo inferiores aos observados quando se aumentou o nível de adesivo de 9 para 12%. O tratamento também reduziu o IE reversível e a TNRE, e segundo o autor foi devido às mudanças químicas nas partículas e à liberação das tensões de

compressão que foram promovidas pela vaporização. Os valores de MOE, MOR e LI dos painéis vaporizados foram ligeiramente superiores ou similares aos dos painéis não-tratados (teste).

HSU et al. (1989) avaliaram o efeito do tratamento térmico sobre a estabilidade dimensional e as propriedades de resistência. Os painéis *waferboard*, feitos com resina fenólica, foram tratados termicamente após a sua produção. Os painéis foram novamente prensados, utilizando-se o mesmo ciclo de prensagem, com a diferença de que a pressão foi empregada apenas para prover o contato entre os pratos da prensa e o painel. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 - INCHAMENTO EM ESPESSURA DE PAINÉIS TRATADOS TERMICAMENTE.

ESPESSURA (mm)	TEMPO (min)	IE 24h (%)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	LI (kPa)
7,9	0	16,7	3.868	22,3	441
	2,67	6,3	4.447	19,0	455
11,1	0	11,5	4.633	23,2	407
	4,16	3,9	4.778	20,9	469
19,1	0	6,7	5.716	21,3	338
	10,50	2,3	6.019	18,8	386

FONTE: HSU ET AL. (1989).

Como se observa, foi obtida uma melhoria na estabilidade dimensional do painel, avaliada em relação ao IE, para todas as espessuras e tempos de tratamento. O aumento do tempo de tratamento em combinação com ao aumento da espessura do painel proporcionou maior redução de IE e melhoria de MOE e LI. No entanto, o tratamento reduziu ligeiramente MOR. Como pode ser visto, do mesmo modo que na madeira sólida, em painéis aglomerados as propriedades de resistência são mais afetadas que as elásticas.

SUCHSLAND e XU (1991) fizeram o pós-tratamento de painéis de flakes de yellow-poplar por 15 minutos a 232°C. Infelizmente maiores detalhes sobre a forma do tratamento não são dados pelos autores, mas os resultados indicaram que o tratamento não influenciou a qualidade da colagem, avaliada pela LI, mas implicou

claramente numa redução do IE dos painéis. Segundo os autores, o IE pode ser explicado pela redução da higroscopicidade e liberação das tensões de compressão induzida aos painéis durante a prensagem.

OHLMEYER e KRUSE (1999) avaliaram o efeito da estocagem a quente de painéis aglomerados sobre o IE. Foram comparados lotes de painéis que foram resfriados e depois empilhados com lotes de painéis que foram estocados logo após a prensagem, ou seja, ainda quentes. Os resultados apontaram para uma redução do IE dos painéis estocados ainda quentes. Os autores argumentam que nesta condição tem-se a continuidade da cura da resina dos painéis, o que melhora a ligação interna e consequentemente reduz o IE.

HASHIM et al. (2001) avaliaram o efeito da remoção de extrativos sobre a estabilidade dimensional de painéis aglomerados produzidos com madeira de Acacia. Os painéis produzidos com partículas livres de extrativos apresentaram melhoria significativa na qualidade da colagem, enquanto que o IE e a ABS foram influenciados negativamente. Os autores não discutem esses resultados, que demonstram uma certa inconsistência, uma vez que a melhoria na qualidade da colagem tem influência positiva sobre o IE, como discutido anteriormente.

A prensagem a quente dos painéis implica em uma variação da sua densidade no sentido da espessura. Geralmente, painéis aglomerados são mais densos na região logo abaixo da superfície, atingindo os menores valores no centro. Essa característica é chamada de gradiente vertical de densidade (GVD) e pode ser controlada através da manipulação das variáveis de prensagem (tempo e temperatura de prensagem, tempo de fechamento da prensa) bem como teor de umidade do colchão de partículas.

No ensaio de flexão estática a madeira está sujeita a três tipos de tensão: compressão paralela às fibras na superfície superior; tração paralela na superfície inferior; e cisalhamento na região localizada na metade da espessura do painel. Se os painéis apresentam um GVD mais acentuado (maior densidade na superfície)

isso implica em maiores valores de flexão estática. Por outro lado, se o gradiente não é acentuado, e a densidade no centro é próxima à da superfície, a LI é privilegiada.

O tipo de tratamento térmico utilizado por HSU et al. (1989) implica, teoricamente, em uma acentuação do GVD. Isso ocorre porque a temperatura em ambas as superfícies do painel (superior e inferior) será muito maior que no centro, o que, juntamente com a leve pressão permite que seja comprimida em maior intensidade, densificando-se. Talvez seja por essa razão que os painéis apresentaram maior MOE quando foram tratados em prensa.

No entanto, alguma densificação na região central também pode ter ocorrido, o que explica a melhoria de LI. Devido à quantidade limitada de resina, a densificação tem um importante papel para formação de ligações mecânicas efetivas entre as partículas (DAI, 2001). No entanto, essa densificação pode ser em função do colapso como sugere JONES et al. (1999). No entanto, a densificação ocorrerá apenas se a temperatura for superior a T_g , como foi explicado anteriormente. O teor de umidade do painel, e não apenas a temperatura, também tem influência sobre a densificação (LENTH e KAMKE, 2001).

Os trabalhos citados acima se referem a aplicação de calor em um ambiente seco, à pressão atmosférica ou pelo contato direto da superfície quente (condução). Entretanto, outras formas de aplicar calor podem ser utilizadas para a melhoria da estabilidade dimensional tal como a vaporização durante a prensagem.

Recentemente desenvolve-se a tecnologia de prensagem com injeção de vapor (PIV) para a produção de painéis de madeira de maior espessura. Assim, a prensa possui pratos perfurados por onde o vapor é injetado diretamente sobre o colchão de partículas, permitindo a transferência de calor muito mais rápida para o interior do painel em comparação à prensa convencional. O emprego dessa tecnologia permite a redução do tempo de prensagem e a melhoria da estabilidade dimensional do painel.

KWON e GEIMER (1998) avaliaram o efeito do tempo e da pressão de aplicação do vapor na prensagem, sobre a estabilidade dimensional de painéis tipo *flakeboard* produzidos com resina a base de isocianato e exposto a diferentes URA (Tabela 6).

TABELA 6 - EFEITO DA PRENSAGEM SOBRE A ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE PAINÉIS FLAKEBOARD.

TRATAMENTO	ABS (%)		IE (%)		EL (%)	
	65%	90%	65%	90%	65%	90%
Convencional	8,4a ⁽¹⁾	17,2a	17,3a	28,7a	0,24	0,36a
10/690 ⁽²⁾	8,3ab	15,9b	7,4b	14,8b	0,23	0,33ab
10/1380	8,1bc	15,6c	6,5bc	13,2bc	0,24	0,33ab
30/690	8,2bc	15,5c	4,2cd	10,6cd	0,23	0,31bc
30/1380	8,1c	15,3d	3,1d	8,8d	0,22	0,29c

FONTE KWON E GEIMER (1998);

(1) Médias seguidas pela mesma letra dentro da mesma coluna não são diferentes estatisticamente ao nível de $\alpha = 0,05$;

(2) Tempo (segundo) e pressão (kPa).

Os resultados demonstraram que o aumento do tempo e da pressão de aplicação do vapor na prensagem reduz ABS, IE e EL em comparação à prensagem convencional, sem vapor (Tabela 6). O IE foi a propriedade que respondeu melhor à aplicação de vapor, com uma redução superior a 50%. Fica evidente que o aumento do tempo e da pressão de aplicação do vapor na prensagem reduz a absorção de água, o inchamento em espessura e expansão linear em comparação à prensagem convencional, sem vapor. Os autores relatam que a aplicação do vapor não afetou as propriedades mecânicas (MOR e MOE) dos painéis.

Recentemente, os mesmos autores (GEIMER e KWON, 1999) observaram reduções significativas de IE de painéis OSB com aumento do tempo e da pressão de vapor aplicada na prensagem. Os autores creditam esse fato como um resultado da combinação entre a plasticização das partículas, a "fluidez da lignina", e a modificação química.

2.3.2 Alterações na Composição Química

As alterações na composição química da madeira tratada e também de seus produtos explicam muitas das alterações observadas em diversas de suas propriedades em função do tratamento térmico. Assim, quando a madeira é aquecida ocorrem mudanças na natureza de seus componentes (celulose, hemicelulose, lignina e extrativos), o que pode modificar sua higroscopicidade, estabilidade, difusibilidade e permeabilidade (HILLIS, 1984). Esse é então um tema que vem sendo bastante estudado ao longo dos últimos anos e que pode ajudar a esclarecer os motivos pelos quais a madeira e seus produtos têm diversas de suas características alteradas.

Quando a madeira é submetida a temperaturas superiores a 105°C por longos períodos, ou mesmo por curto período, mas a alta temperatura, alguns de seus constituintes podem ser degradados. Se as condições forem mais severas (maiores temperaturas e tempo) inicia-se a liberação de dióxido de carbono (CO_2), certa quantidade de monóxido de carbono (CO) juntamente com uma grande quantidade de compostos que podem ser recuperados no destilado (STAMM, 1964). Assim, tem-se a degradação térmica da madeira que pode ser dividida em 4 fases, segundo BROWN et al. (1952):

- a) fase 1 - Até 100°C: baixa liberação de gases, sendo os principais produtos água e óleos voláteis, e uma pequena quantidade de ácido acético e traços de metanol;
- b) fase 2 - 100 a 275°C: liberação de ácido pirolenhoso e gases;
- c) fase 3 - 275 a 350°C: reações exotérmicas, formação da maior parte dos destilados e liberação de gases inflamáveis;
- d) fase 4 - Acima de 350°C: ocorre após a finalização das reações exotérmicas e inicia-se a formação do carvão.

Os produtos da degradação térmica da madeira são na sua totalidade oriundos da decomposição de seus compostos químicos primários. Assim, os principais compostos produzidos são os ácidos fórmico e acético, ésteres, aldeídos e cetonas, resultantes principalmente das hemiceluloses; álcool metílico, dos grupos metoxil da lignina e fenóis, resultantes dos núcleos aromáticos da lignina (STAMM, 1964).

CHOW e PICKLES (1971), num dos trabalhos mais completos sobre a degradação da madeira, afirmam que quando a madeira é tratada acima de 180°C, duas principais reações ocorrem: uma é a reação de degradação ou modificação dos seus componentes químicos, podendo incluir reações tais como a desidratação de macromoléculas e conversão de grupos funcionais sensíveis ao calor; a outra é a degradação da cristalinidade, diminuindo o comprimento da cadeia de celulose. A cristalinidade de celulose será discutida mais à frente. Podem ocorrer também reações de polimerização dos extrativos e da lignina, gerando produtos que exibem forte natureza adesiva, melhorando assim as propriedades de resistência e estabilidade dimensional, tal como ocorre em adesivos fenólicos.

HSU et al. (1988), citado anteriormente, também avaliaram o efeito do tempo de vaporização a 1,55 MPa sobre a composição química de duas espécies: aspen e lodgepole. A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados pelos autores e donde pode-se observar que as porcentagens de lignina e celulose praticamente não sofreram alteração com o tratamento térmico, enquanto que para a hemicelulose é observa-se uma redução com o aumento do tempo de tratamento.

TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE PARTÍCULAS DE MADEIRA VAPORIZADAS.

ESPÉCIE	TEMPO (min)	LIGNINA (%)	CELULOSE (%)	HEMICELULOSE (%) ⁽¹⁾
Aspen	0	20,73	43,72	18,51
	1	19,54	41,89	18,12
	2	19,64	40,12	16,44
	3	20,46	41,05	14,66
	4	19,97	42,54	11,44
Lodgepole Pine	1	27,84	38,65	16,95
	2	28,44	37,51	16,85
	3	29,00	37,62	14,76
	4	29,02	37,28	13,79

FONTE: ADAPTADO DE HSU ET AL. (1988).

(1) aspen = xilose; lodgepole pine = xilose+manose+galactose+arabinose.

Segundo ROWELL e YOUNGS (1981) dentre os carboidratos as hemiceluloses são as mais susceptíveis a degradação térmica. Nota-se também que existe uma diferença de comportamento entre a folhosa e a conífera com relação à degradação térmica.

Esse aspecto tem sido levado em consideração em alguns estudos como o de ZAMAN et al. (2000). Os autores estudaram as alterações na composição química de *Pinus sylvestris* e *Betula pendula* na faixa de 200 a 230°C. Avaliaram o grau de degradação da lignina, extrativos e carboidratos e também a perda de massa da madeira submetida a vaporização por períodos 4 a 8 horas. Pela análise da Tabela 8, o aumento do tempo e da temperatura implicou em maior perda de massa que chegou até 15,2% a 230°C por 8 horas para o pinus.

Nota-se também aumento da lignina e redução dos carboidratos. Segundo os autores, os carboidratos são os polímeros mais susceptíveis à degradação térmica sendo responsáveis por até 36,9% do volume da perda de massa para a madeira de pinus. Assim, ocorre um aumento na porcentagem de lignina quando a madeira é tratada termicamente. A madeira de conífera tem maior porcentagem de lignina, enquanto as folhosas possuem mais carboidratos o que explica que a madeira de betula tenha se decomposto mais rapidamente que a madeira de pinus.

TABELA 8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PERDA DE MASSA DA MADEIRA DE *PINUS SYLVESTRIS* VAPORIZADA.

TEMPERATURA (°C)	TEMPO (MIN)	MASSA (%)	LIGNINA (%)	EXTRATIVOS (%)	CARBOIDRATOS (%)
Controle	-	-	24,5	3,2	72,3
205	4	-5,7	30,1	3,8	66,1
	6	-6,8	30,5	2,7	66,8
	8	-7,0	32,3	3,2	64,5
230	4	-11,1	35,9	3,0	62,0
	6	-13,2	37,1	4,4	58,5
	8	-15,2	38,7	3,8	57,5

FONTE: ZAMAN ET AL. (2000).

BOURGOIS e GUYONNET (1988) estudaram as características físico químicas e a degradação dos compostos químicos em madeira de "Pinus maritimo" submetido à retificação térmica a 260°C em períodos de 1/4 a 4 horas. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 - ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA MADEIRA DE *PINUS* TRATADA TERMICAMENTE.

CARACTERÍSTICA	TEMPO (HORAS)				
	0	1/4	1/2	1	4
Massa final (%)	-	81,47	75,70	70,00	50,13
Análise Elementar C (%)	53,06	55,00	55,97	59,36	70,71
O (%)	41,07	39,16	38,24	35,12	24,49
H (%)	5,76	5,75	5,66	5,42	4,66
N (%)	0,11	0,09	0,13	0,08	0,14
Extrativos (%)	12,83	11,89	10,10	9,45	8,39
Cinzas (%)	0,30	0,30	0,32	0,39	0,72
Lignina (%)	28,00	37,00	41,00	51,00	84,00

FONTE: BOURGOIS E GUYONNET (1988).

Pela análise da Tabela 9 observa-se que o aumento do tempo de tratamento implica em maior perda de massa, maior porcentagem de C e H, e redução da porcentagem de O e N, ou seja, tem-se de fato uma alteração da composição química elementar da madeira como um todo. Ocorre também a redução de extrativos e o aumento do teor de cinzas e lignina.

Os autores avaliaram ainda as alterações químicas dos principais polímeros da madeira. Para a celulose não foi detectada alteração de sua cristalinidade avaliada sobre a difração do raio x. As hemiceluloses foram analisadas como pentosanas, e os resultados apontaram para uma degradação quase total de seus níveis, passando de 8,99% (controle) para 0,48% (4 horas). Para a lignina foi observado que a taxa de metoxil, que é parte de sua estrutura, foi reduzida com aumento do tempo de tratamento, passando de 14,70% (controle) para 6,64% (4 horas).

Diante do anteriormente exposto, fica evidente que dentre os principais polímeros da madeira, a celulose é a mais estável com relação à degradação química, seguida pela lignina e por fim pela hemiceluloses, as menos estáveis. No entanto, isso implica apenas em níveis de degradação, ou seja, depolimerização dos constituintes químicos.

A celulose é um polímero que constitui o arranjo de filamentos de microfibrilas. Possui duas regiões distintas: a cristalina, que é altamente ordenada; e a amorfa, que é altamente desordenada. Desse modo o grau de cristalinidade (GC) é a relação entre quanto da celulose é cristalina e quanto é amorfa (KOLLMANN e CÔTÉ JR., 1968) e a sua determinação é de considerável importância em relação às propriedades de resistência, bem como para as relações da madeira com a água (STAMM, 1964). O aumento da cristalinidade da celulose foi significativamente relacionada à menor deformação da madeira no ensaio de tração paralela às fibras, como observado por EL-OSTA e WELLWOOD (1972).

Acredita-se que a água entra livremente através da região amorfa da celulose, sendo adsorvida nos grupos hidroxilas disponíveis. Entretanto, na região cristalina a água é adsorvida apenas em sua superfície, uma vez que é incapaz de penetrar a estrutura cristalina. Assim, a adsorção de água de uma determinada madeira é inversamente proporcional à GC, ou seja, diretamente proporcional à quantidade de celulose amorfa (STAMM, 1964).

Fica evidente então que qualquer tratamento que aumente GC provavelmente vai reduzir TUE e o inchamento da madeira. Alguns trabalhos têm demonstrado que o tratamento térmico de fato aumenta GC (ISHIGURI et al. 2001b; BHUIYAN et al. 2001, BHUIYAN et al. 2000) embora isso não tenha sido comprovado por outros autores (CHOW e PICKLES, 1971).

Como visto anteriormente, na degradação térmica da madeira ocorre liberação de ácidos acético e fórmico e isso contribui para redução do seu pH (SEKINO et al. 1998; KOLLMANN e CÔTÉ JR., 1968). A acidificação da madeira tratada termicamente é então um indicativo químico de sua degradação térmica, segundo SARNI et al. (1990). Esses autores avaliaram o efeito do tratamento térmico de partículas de madeira a 120 e 250°C por 1, 3 e 6 horas sobre a composição química e o pH. Os resultados mostraram que o pH da madeira é pouco afetado até 170°C, ficando em torno de 4. A partir dessa temperatura ocorre uma ligeira redução a 190°C, e alcança o valor mínimo de 3 quando a madeira é tratada a 250°C.

Especificamente para painéis de madeira poucos trabalhos sobre alterações químicas em função do tratamento térmico estão disponíveis, podendo-se citar HSU et al. (1989). Os autores não observaram qualquer alteração pronunciada da composição química dos painéis tratados termicamente, como pode ser observado na Tabela 10. Observa-se que mesmo as hemiceluloses, que são mais sensíveis à degradação térmica, não apresentam variação de porcentagem com relação à espessura do painel e ao tempo de tratamento.

TABELA 10 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE PAINÉIS FLAKEBOARD TRATADOS TERMICAMENTE.

ESPESSURA (mm)	TEMPO (min.)	COMPOSTOS INSOLÚVEIS H ₂ O (%)	LIGNINA KLASON (%)	CELULOSE (%)	XILOSE (%)
7,9	0	98,75	23,81	44,44	21,02
	2,67	98,07	23,92	44,32	20,56
11,1	0	98,46	23,13	45,01	20,62
	4,16	98,26	24,74	42,44	19,53
19,1	0	98,28	23,12	44,58	20,82
	10,50	98,04	25,60	44,88	20,04

FONTE: HSU ET AL. (1989).

2.3.3 Alterações na Resistência Biológica

Para o ataque de qualquer agente xilófago são necessárias condições de substrato e ambientais adequadas ao seu desenvolvimento. As condições de substrato são aquelas relativas propriamente à madeira, ou seja, presença de alimento, ausência de inibidores, umidade e porosidade. As ambientais são o teor de umidade, temperatura e fornecimento ou não de oxigênio. Como se pode notar o tratamento térmico afeta as condições do substrato, e como visto anteriormente, altera a sua composição química (degradação das hemiceluloses), o que implica em redução da disponibilidade de alimento. Além disso, tem-se também a redução de TUE, que afeta negativamente o desenvolvimento dos agentes xilófagos. Por outro lado, WEILAND e GUYONNET (2003) apontam três teorias distintas que explicariam a resistência da madeira termicamente tratada frente a fungos xilófagos:

- a) O tratamento térmico estimula a criação de novas moléculas livres, que agiriam como fungicidas;
- b) Algumas moléculas provindas do tratamento térmico podem reticular na rede de lignina, dificultando o reconhecimento do substrato pelo fungo;
- c) O tratamento térmico provoca a eliminação de hemiceluloses, as quais são componentes elementares da dieta do fungo.

Deste modo, o tratamento térmico é reconhecido como um eficaz meio de prover resistência biológica à madeira, possuindo inclusive prescrição de tratamento para as distintas classes de risco biológico segundo normas européias, como pode ser visto em SYRJÄNEN e KANGAS (2000). No entanto, os extrativos, compostos responsáveis pela resistência biológica, também são degradados pelo tratamento térmico, o que pode implicar em maior facilidade de ataque por xilófagos às madeiras tratadas. Nos próximos parágrafos serão abordados alguns desses aspectos.

DOI et al. (1998) avaliaram a vaporização de larch a 170°C em autoclave, por períodos de 30 a 240 minutos. As amostras tratadas foram expostas ao cupim (*Coptotermes formosanus*) e os resultados apontaram para a perda de resistência biológica em função da vaporização. Assim, amostras não vaporizadas foram mais resistentes ao ataque dos cupins que as vaporizadas. No entanto, a perda de resistência biológica foi maior, quanto menor foi o tempo do tratamento. Os autores explicam que alterações químicas ocorridas na madeira vaporizada são, possivelmente, as responsáveis pela maior atração dos cupins. Dentre essas alterações, destacam-se a degradação, remoção e modificação dos extrativos do cerne que bloqueiam o ataque dos cupins e a degradação das hemiceluloses formando produtos mais atrativos aos cupins.

DOI et al. (1999) trataram termicamente 7 espécies de madeira em estufa a 60 e 150°C, com períodos variando de 24 a 96 horas. Empregaram também a vaporização em autoclave a 150°C por períodos de 1 a 4 horas. Em seguida amostras dessas madeiras foram expostas a duas espécies de cupins. Os resultados mostraram que as amostras vaporizadas foram mais atacadas, ou seja, maior perda de massa, em comparação com a madeira não tratada em todas as espécies avaliadas. O tratamento em estufa apresentou resultado melhor que a vaporização.

Os autores supõem que a vaporização afetou a atração dos cupins, através da produção de substâncias mais atrativas, bem como a alteração das substâncias possivelmente repelentes. Sabidamente, os extrativos são as principais substâncias repelentes da madeira em relação aos agentes xilófagos e como visto anteriormente também são degradados termicamente.

Resultados semelhantes aos de DOI et al. (1999) são apresentados por YAMAMOTO et al. (2001). Tábuas de douglas-fir foram secas em alta temperatura (115, 125 e 135°C) e expostas a cupins. O tratamento implicou em redução da resistência biológica, e essa redução foi mais pronunciada no cerne que no alburno. Isso se deve ao fato de que é no cerne que estão as substâncias repelentes (extrativos) que conferem resistência biológica à madeira. Com a alta temperatura esses compostos, provavelmente foram transformados em compostos mais palatáveis aos cupins, argumentam os autores.

Os trabalhos apresentados anteriormente abordavam a vaporização de madeira úmida. Nessas condições as alterações químicas são mais severas, o que pode causar prejuízos à resistência biológica. Além disso, a madeira tratada foi exposta a cupins, agentes xilófagos mais severos que os fungos. Quando se faz o tratamento térmico da madeira seca os resultados são bastante positivos quando expostas a fungos xilófagos. KIM et al. (1998), cujo tratamento térmico foi apresentado anteriormente, avaliaram a resistência biológica de *Pinus radiata* ao fungo *Tyromices palustris* em ensaio de laboratório. Os resultados são apresentados na Tabela 11. A temperatura e o tempo de tratamento tiveram influência sobre a melhoria da resistência ao apodrecimento como pode ser visto. Assim, o aumento da temperatura e do tempo do tratamento implicou em melhoria na resistência ao apodrecimento.

TABELA 11 - EFEITO DA TEMPERATURA E TEMPO DE TRATAMENTO NA MELHORIA DA RESISTÊNCIA AO APODRECIMENTO.

TEMPO (h)	TEMPERATURA (°C)		
	120	150	180
6		34,1	41,3
12	34,6 ⁽¹⁾	40,4	49,1
16	-	-	56,5
20	-	-	69,9
24	36,5	46,7	-
48	44,0	63,9	-
72	51,8	-	-

FONTE: KIM ET AL. (1998).

(1) Melhoria relativa à resistência da madeira não tratada (0%).

Segundo TJEERDSMA et al. (1998b) a melhoria da resistência biológica da madeira tratada termicamente envolve dois aspectos: à redução do PSF da madeira a um nível mais baixo daquele necessário ao ataque biológico e à alteração da estrutura química da parede celular de forma que o microorganismo não reconhece o substrato para promover um ataque. Entretanto, o efeito do tratamento térmico sobre a resistência biológica é variável de espécie para espécie como pode ser visto nas Tabelas 12 e 13.

TABELA 12 - PERDA DE MASSA (%) PARA MADEIRAS TRATADAS E NÃO-TRATADAS NO ENSAIO COM FUNGOS DE PODRIDÃO MOLE E BACTÉRIAS.

ESPÉCIE	NÃO-TRATADA	TRATADA
Poplar	61	19
Beech	57	19
Abachi	19	2
Spruce	14	2
Scotch pine	11	4
Dougla fir	14	3

FONTE: TJEERDSMA ET AL. (1998A).

TABELA 13 - PERDA DE MASSA (%) PARA MADEIRAS TRATADAS E NÃO-TRATADAS SEGUNDO O FUNGO APODRECEDOR.

ESPÉCIE	<i>Coriolus versicolor</i>		<i>Coniophora puteana</i>	
	Tratada	Não-tratada	Tratada	Não-tratada
Radiata pine	1	9	0	26
Scots pine	1	4	2	12
Douglas fir	1	1	0	9
Spruce	4	12	3	19

FONTE: TJEERDSMA ET AL. (2000).

2.3.4 Alterações de Outras Propriedades

Além das propriedades relatadas acima, o tratamento térmico pode afetar outras características da madeira e de seus subprodutos, tais como a cor, a anatomia, acabamento e a qualidade da superfície.

Um dos primeiros estudos sobre a alteração da cor da madeira em função do tratamento térmico foi feito por CHOW e MUKAI (1972). No estudo, lâminas de white spruce (*Picea glauca*) foram submetidas ao tratamento térmico à 180°C por 60, 180, 300 e 480 minutos. A intensidade da cor foi determinada por um espectrofotômetro de reflectância antes e após o tratamento térmico. O aumento da diferença entre a intensidade antes e depois do tratamento foi determinado como sendo altamente relacionado à redução da cristalinidade e da polimerização da celulose. Segundo os autores, durante o tratamento térmico a α -celulose presente na madeira, passa por uma sequência de alteração de cor, indo do branco ao amarelo, passando pelo marrom avermelhado para torna-se quase preta ao final do tratamento. Assim, a alteração da cor na superfície da madeira pode ser utilizada como um indicador do processo de degradação térmica, representando não apenas a lignina como também os carboidratos.

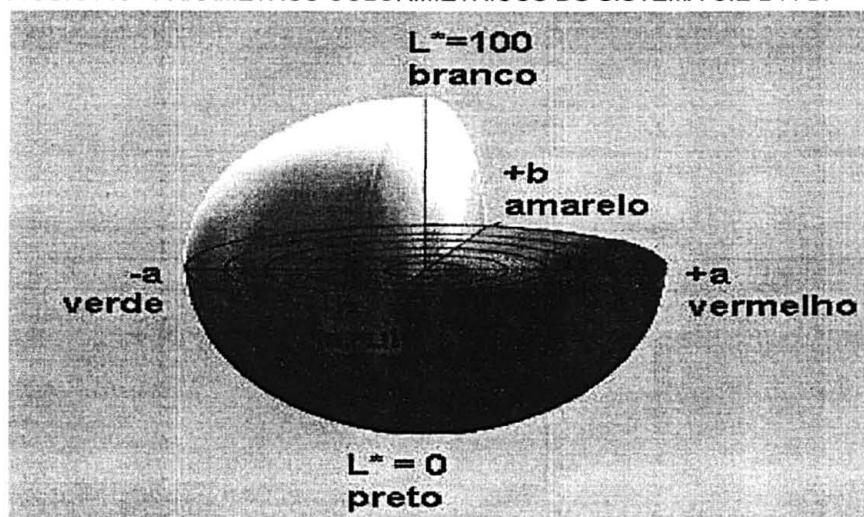
TROUGHTON e CHOW (1973) estudaram a reflectância em madeira tratada em temperaturas de 150, 175 e 195°C. Os resultados apontaram para um pico na reflectância em comprimentos de onda de entre 410 μm e 430 μm , além da

descoberta que os extrativos têm um importante papel na alteração da intensidade da cor da madeira de douglas-fir. A alteração da reflectância também foi observada por MITCHELL (1988) em madeira de *Pinus taeda* tratada a 150°C por 1, 2, 4, 8 ou 16 horas.

Na atualidade o sistema mais moderno para colorimetria é o CIE $L^* a^* b^*$ (Comissão Internacional de L'éclairage/Comissão Internacional de Iluminantes). Neste sistema a definição da sensação da cor é feita com base em três parâmetros: a claridade, a tonalidade e a saturação (CAMARGOS e GONÇALEZ, 2001).

A claridade (L^*) define a escala de cinza, entre o branco e o preto, e é representada graficamente por um reta perpendicular a um círculo passando pelo seu centro, podendo assumir valores de 0, preto absoluto, a 100, branco total. A tonalidade é expressa pelas cores primárias (vermelho, verde, amarelo e azul) sendo representada graficamente por um círculo cortado por duas retas perpendiculares (horizontal e vertical) passando pela origem (Figura 15).

FIGURA 15 - PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DO SISTEMA CIE $L^* a^* b^*$.



FONTE: BARROS (2002)

O eixo horizontal é composto por duas semi-retas a partir da origem: a do vermelho, que vai até 0° e do verde, na extremidade oposta, que vai até 180°. Do mesmo modo o eixo vertical é dividido em duas semi-retas: a do amarelo, que vai até 90°, e a do azul que vai até 270°. Deste modo, os pigmentos vermelho, verde,

amarelo e azul são definidos pelas variáveis $+a^*$, $-a^*$, $+b^*$ e $-b^*$ (variam de 0 a 60), as quais são empregadas para expressar o ângulo da tinta, h. Já a saturação é o desvio a partir do ponto correspondente ao cinza no eixo L^* , e quanto mais distante do eixo mais saturada é a cor. A saturação é representada por C, varia de 0 a 60, e também é derivada a partir das variáveis a^* e b^* . (BARROS, 2002; CAMARGOS e GONÇALEZ, 2001).

Assim, BOURGOIS et al. (1991) demonstraram a boa correlação entre o cor da madeira tratada termicamente e os seus componentes químicos, tal como advogava CHOW e MUKAI (1972). Os autores trataram termicamente madeira de scots pine (*Pinus sylvestris*) entre 100 e 310°C em tempos de 30 ou 60 minutos e os parâmetros colorimétricos foram obtidos pelo sistema CIE L^*a^*b . Os resultados mostraram alta correlação entre o L^* da madeira tratada e alguns de seus constituintes elementares: carbono, oxigênio, hidrogênio e lignina (Tabela 14).

TABELA 14 - RELAÇÃO ENTRE A CLARIDADE (L^*) E CONSTITUINTES QUÍMICOS DE MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.

TRATAMENTO (°C)	L^*	LIGNINA (%)	C (%)	O (%)	H (%)
-	68,8	24,3	-	-	-
100	65,0	23,0	47,6	44,7	6,4
250	40,6	25,6	51,9	42,2	5,9
280	27,3	30,4	57,1	36,5	5,9
310	11,2	45,6	70,9	24,1	4,68

FONTE: BOURGOIS ET AL. (1991).

CHARRIER et al. (2002) também utilizaram o sistema CIE L^*a^*b para estudar a alteração da cor da madeira de black walnut (*Juglans regia*). Os autores estudaram a alteração da cor do cerne de toras, em função do seu aquecimento em água para a produção de lâminas. Foram testados 5 tempos para a temperatura de 90°C: 0, 7, 31, 39 e 51 horas de vaporização. Os resultados demonstraram redução significativa de L^* já para as toras vaporizadas por 7 horas tanto para madeira oriunda de cerne, quanto a de alburno. SUNDQVIST (2002) também observou redução de L^* para as madeiras de scots pine (*Pinus sylvestris*), birch (*Betula*

pubescens) e Norway spruce (*Picea abies*) mesmo a temperaturas ligeiramente mais baixas (65 e 85°C), mas tempos mais longos (1 a 6 dias). Recentemente ISHIGURI et al. (2003) avaliaram o efeito do tratamento térmico pela fumigação sobre as propriedades colorimétricas de sugi (*Cryptomeria japonica*). Os autores identificaram um incremento de L* influenciado pelo aumento no tempo de fumigação de 5 para 40 horas.

No Brasil o sistema colorimétrico CIE L* a* b* foi introduzido em 1994, por meio de um curso de curta duração ministrado no Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA. Desde então avaliações colorimétricas vêm sendo incluídas em diversos estudos, como para avaliação de secagem (BARROS, 2002), elaboração de tabela de cores para madeiras tropicais (CAMARGOS e GONÇALEZ, 2001), alteração da cor pela termorreificação (PINCELLI, 1999) e avaliação de fotodegradação (BARROS, 1999).

A inativação térmica é uma mudança induzida pelo calor na superfície da lâmina de madeira que reduz a absorção de líquidos, causando a perda da capacidade de adesão (JORDAN e WELLONS, 1977). Essa mudança pode ocorrer em lâminas expostas a altas temperaturas durante o processo de secagem. Os estudos têm apontado para uma perda de capacidade de colagem de lâminas com superfície inativa (CHRISTIANSEN, 1997; CHRISTIANSEN, 1991; CHRISTIANSEN, 1990; SANDOE et al. 1983). A inativação envolve mecanismos físicos, detalhados por CHRISTIANSEN (1990), que dificultam a colagem de lâminas de três formas relevantes: exsudação de extrativos para superfície da lâmina; reorientação das moléculas superficiais e irreversível fechamento dos microporos da madeira. Além destes mecanismos há também reações químicas (CHRISTIANSEN, 1991) tais como oxidação e pirólise dos sítios de adesão, e acidificação dos extrativos constituintes da madeira.

PINCELLI et al. (2002) avaliaram os efeitos do tratamento térmico sobre a colagem da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Os autores trataram a madeira em temperaturas de 120 -180°C e conduziram ensaios de resistência ao cisalhamento empregando três tipos de adesivo. Os resultados indicaram que a termorreificação não afetou as características da colagem.

FEIST e SELL (1987) investigaram o efeito do tratamento térmico sobre a resistência ao *weathering* e na capacidade de reter acabamentos superficiais. Testaram madeira de european spruce (*Picea abies*) e beech (*Fagus silvatica*) tratadas com temperatura (175-185°C) e pressão (10 bar) por 2 e 3 horas. Observou-se para a madeira tratada resistência maior à degradação fotoquímica e à erosão durante o ensaio de *weathering* artificial e também natural. Por outro lado, o tratamento térmico não influenciou a durabilidade de acabamentos durante o ensaio. Mais recentemente, AYADI et al. (2003) também comprovaram que a madeira tratada termicamente apresenta maior estabilidade de cor em relação ao *weathering* em comparação à madeira não-tratada.

2.3.5 Cinética da Degradação Térmica da Madeira

Como visto nos parágrafos anteriores, a madeira quando submetida à ação do calor tem suas características alteradas. É modificado seu comportamento mecânico, sua movimentação dimensional, sua capacidade de reter umidade, e até mesmo seus caracteres anatômicos. No centro de todas essas alterações estão seus principais componentes químicos: a lignina, a celulose e a hemicelulose. A madeira é um material composto pela junção destes três principais componentes químicos. Sendo assim, qualquer alteração dos compostos químicos em função da ação do calor, refletirá nas características como um todo da madeira.

Na indústria química, na qual a material prima é a madeira, podem ser empregados dois processos distintos para a sua utilização: (a) processos que envolvem reações onde a estrutura da fibra é preservada, e (b) processos que tal

estrutura é completamente destruída. No grupo (a) estão os processos para produção de fibras, tais como isolamento da celulose, e produção de polpa de fibras para painéis (MDF, HDF, etc).

No grupo (b) estão os processos em que a madeira é inteiramente destruída, ou seja, a destruição da estrutura da fibra está diretamente relacionada à sua utilização. Incluem-se nesse grupo os processos que utilizam a madeira como combustível bem como processos em que a madeira tem valor do ponto de vista calórico. (WENZL, 1970). A hidrólise é um processo em que a destruição da estrutura da madeira está relacionada à sua utilização. Entretanto, tem-se também a pirólise que é empregada há muito mais tempo que a hidrólise.

Para tanto, serão abordados aspectos relativos às reações de hidrólise, bem como reações de pirólise. Optou-se por esta abordagem, uma vez que no aquecimento da madeira úmida ou mesmo aquecimento em vapor tem-se lugar reações de hidrólise, enquanto que no aquecimento da madeira seca ocorrem reações de pirólise. Estas reações também podem ocorrer simultaneamente quando a madeira é aquecida a temperaturas mais elevadas.

2.3.5.1 Principais Reações: Tipos e Taxas

As reações químicas do ponto de vista de suas taxas podem ser classificadas como reações homogêneas ou heterogêneas. As primeiras ocorrem completamente em apenas uma única fase, enquanto que as outras ocorrem em duas ou mais fases, ou mesmo transformações de uma fase para outra (STAMM, 1964).

As reações químicas também podem ser classificadas com base em sua ordem. As reações de 1ª ordem, ou unimoleculares, e são aquelas em que uma única molécula é quebrada em duas ou mais moléculas. Por outro lado, as reações de 2ª ordem são aquelas bimoleculares, em que duas moléculas idênticas ou não reagem para produzir uma ou mais moléculas.

Segundo os princípios de ação das massas, as reações de 1ª ordem se processam a uma taxa proporcional à quantidade do reagente ainda disponível para reação, conforme equação 1, onde x é a quantidade do material, a , que reage no tempo t , e K é a velocidade constante da reação:

$$\frac{dx}{dt} = K_1 (a - x) \quad (1)$$

Integrando a equação 1 obtêm-se a equação 2, onde o logaritmo negativo da fração residual do material reagente é proporcional ao tempo. Evidencia-se que o termo da equação 2 expressa claramente a porcentagem residual (PR) do reagente que permaneceu sem reagir, o que permite reescrevê-la como na equação 3:

$$K_1 = \frac{-2,3 \log \left[\frac{a-x}{a} \right]}{t} \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{-2,3 \log PR}{t} \quad (3)$$

Se duas moléculas de A reagem com uma outra ou proporções iguais das moléculas A e B reagem, tem-se aí uma reação de 2ª ordem, cuja taxa pode ser expressa pela equação 4, cuja forma integrada produz a equação 5:

$$\frac{dx}{dt} = K (a - x)^2 \quad (4)$$

$$K_2 = \left(\frac{1}{t} \right) \times \left[\frac{x}{a(a-x)} \right] \quad (5)$$

Apenas para as reações homogêneas é possível se determinar a ordem da reação, com relação à taxa. Muitas das reações heterogêneas que envolvem sólidos

porosos, como a madeira e demais materiais celulósicos, são complexas pelo fato de que líquidos ou gases tem que difundir através do sólido. Assim, se o processo de difusão é mais lento que a reação em si, a taxa de reação será controlada pela difusão (STAMM, 1964).

A taxa de difusão de um vapor ou gás, para ou a partir de um adsorvente, é proporcional ao gradiente de concentração. A taxa em que um sólido se dissolve em um líquido depende da taxa em que a solução saturada formada na superfície do sólido se difunde para saturar o líquido. Tem-se mostrado que esta taxa decresce quando a concentração da solução cresce, de maneira similar às taxas de reação de unimoleculares, ou seja, de primeira ordem. Por isso, as reações controladas pela difusão, como as ocorrentes na madeira, são tratadas como reações de 1ª ordem.

A madeira quando aquecida tem suas propriedades alteradas. A principal alteração é a redução de seus valores iniciais, ou seja, aqueles valores das propriedades da madeira não submetida ao aquecimento. Após o aquecimento, esses valores são reduzidos, similarmente ao que ocorre com os componentes básicos da madeira (que reagem), cujas reações degradativas são assumidas como sendo de 1ª ordem. Assim, é comum empregar essa teoria para calcular a taxa de degradação térmica das diversas propriedades da madeira, ou seja, admitindo-se que o valor residual de uma propriedade é similar ao valor residual de um reagente após o aquecimento. A Tabela 15 apresenta valores de k para algumas propriedades, obtidos em STAMM (1964).

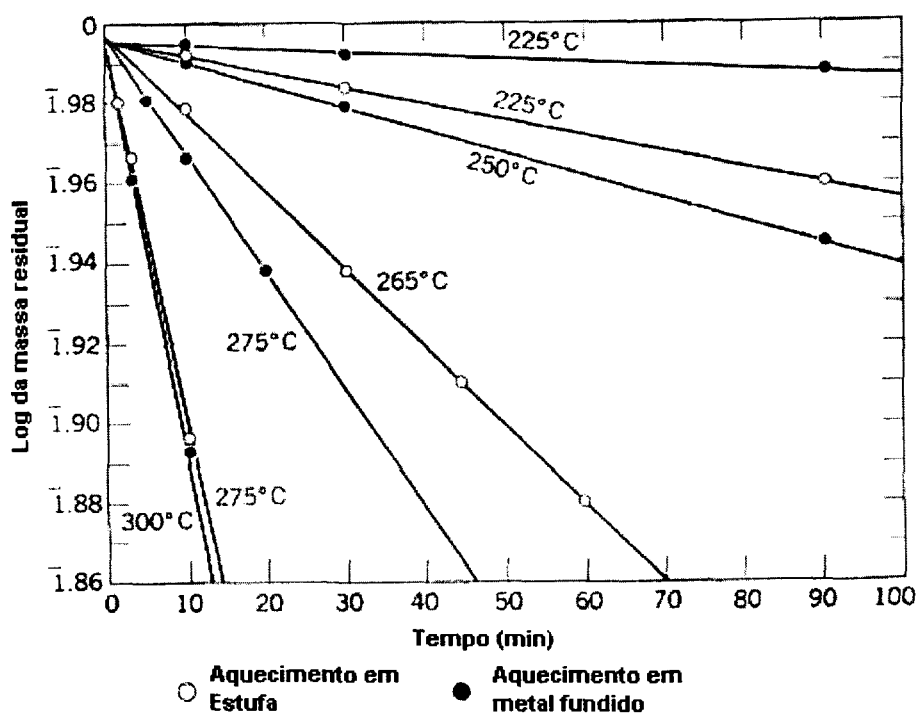
TABELA 15 - TAXA CONSTANTE (K) PARA ALGUMAS PROPRIEDADES.

MATERIAL	PROPRIEDADE	K (a 150°C/h)
Tábua de pinus	Massa	0,00012
Lâmina sitka spruce	Massa	0,000004
Caibros diversos	Módulo de ruptura	0,000125
Caibros diversos	Trabalho na carga máx.	0,0050

FONTE: STAMM (1964).

A Figura 16 apresenta resultados obtidos para a perda de massa em função do aquecimento da madeira em ar e também por meio da superfície de um metal fundido. Observa-se que o logaritmo da massa residual versus o tempo de aquecimento em quatro faixas de temperatura produzem curvas bem retilíneas, com coeficientes de 0,99 a 0,995, indicando que apenas uma pequena parte da madeira reage instantaneamente quando aquecida, não atendendo assim o descrito para reações de 1ª ordem. Segundo STAMM (1964) padrões similares podem ser observados para logaritmo de várias propriedades de resistência versus o tempo de aquecimento. O autor apresenta uma extensa lista de referências que comprovam essas observações.

FIGURA 16 - PERDA DE MASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO.



A taxa em que as reações de degradação térmica da madeira ocorrem é dependente de vários fatores, tais como: tempo de exposição, temperatura, espécie, forma de aquecimento e teor de umidade. De uma forma geral, madeira de conífera degrada mais lentamente que madeira de folhosa, isso porque estas possuem uma

quantidade muito maior de hemiceluloses, composto da madeira que se degrada mais rapidamente, como será visto a frente.

O aquecimento em água ou com vapor causa a degradação muito mais rápida da madeira, que se aquecida em condições secas. Isso porque a presença de água ou vapor causa a formação de ácidos orgânicos, principalmente ácido acético, que catalisam a hidrólise das hemiceluloses em açúcares solúveis, acelerando assim a degradação térmica.

A taxa de degradação térmica também é dependente da atmosfera em que se desenvolve o aquecimento da madeira, especialmente com relação à presença ou ausência de oxigênio. Segundo MITCHELL (1988) a degradação térmica da madeira aquecida na presença de oxigênio é muito mais rápida que aquela ocorrente na madeira aquecida em atmosfera livre de oxigênio. Isso ocorre, porque a presença de oxigênio durante a hidrólise resulta em um processo chamado de oxidação úmida, cuja reação inicial é a formação de ácidos. O aumento na concentração destes ácidos favorece as demais reações hidrolíticas, não apenas para as hemiceluloses, mas também para as celulosas. Desse modo, a combinação de oxidação e hidrólise contribuem para a degradação térmica da madeira.

MITCHELL (1988) estudou a degradação térmica de algumas propriedades da madeira de *Pinus taeda* aquecida em atmosfera de ar, nitrogênio e oxigênio. A Tabela 16 apresenta os valores para o módulo de ruptura residual de acordo com o teor de umidade da madeira, o tempo e o meio de aquecimento.

Por esta Tabela, observa-se que há padrões distintos da madeira quando aquecida em diferentes atmosferas, bem como com relação ao teor de umidade de peça no momento do tratamento. A atmosfera com oxigênio implicou em reduções mais pronunciadas do MOR, o mesmo ocorrendo quando se faz o tratamento em peças úmidas (verde) e com o prolongamento do tempo de tratamento.

TABELA 16 - MÓDULO DE RUPTURA RESIDUAL (%) DA MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.

TU (%)	TEMPO (H)	ATMOSFERA		
		OXIGÊNIO	NITROGÊNIO	AR
0	1	102,9	98,4	104,7
	4	95,5	100,3	101,3
	16	83,6	99,0	99,4
12	1	95,8	102,1	101,1
	4	83,7	89,9	85,0
	16	80,9	76,5	78,3
Verde	1	100,5	96,4	99,0
	4	69,8	70,7	77,5
	16	62,0	64,6	60,8

FONTE: MITCHELL (1988).

O autor afirma que os resultados obtidos no estudo não evidenciaram a relação linear entre a propriedade residual e o tempo, expressa pela taxa de reação de 1ª ordem, dada na equação 1. As curvas sugeriram um melhor ajuste através da equação não-linear 6, onde B_0 , B_1 e B_2 são os parâmetros a serem calculados, e t é o tempo de exposição:

$$PR = B_2 - B_0 \left[1 - e^{-(B_1 t)} \right] \quad (6)$$

A função descrita por essa equação, segundo o autor, foi escolhida não apenas com base na forma sugerida pela distribuição dos dados, mas também por que o tratamento reflete uma taxa de reação típica do processo. Pelo modelo observa-se que com o aumento do tempo de exposição a propriedade residual irá assintoticamente atingir um valor constante de $B_2 - B_0$, onde B_2 é o valor controle, ou seja, sem o tratamento térmico. Assim, a magnitude de perda da propriedade, em função do tratamento térmico, é dada pelo parâmetro B_0 . Por diferenciação da equação 6, obtêm-se a equação 7, onde o parâmetro B_1 é a medida da taxa de perda, e valores elevados indicam uma rápida mudança do valor final:

$$\frac{dPR}{dt} = -B_1 [RP - (B_2 - B_0)] \quad (7)$$

A Tabela 17 apresenta os valores dos parâmetros obtidos por meio da equação 6, e taxa média calculada pela equação 7 para o módulo de ruptura residual, enquanto a Figura 17 apresenta a tendência não-linear dos resultados obtidos. Fica evidente que a degradação do MOR da madeira de *Pinus taeda*, apresenta comportamento distinto conforme a atmosfera de aquecimento e o teor de umidade. A 0% a degradação é mais severa em oxigênio, enquanto que em atmosfera de nitrogênio e ar, praticamente não se observa degradação.

TABELA 17 - PARÂMETROS DO MODELO DA EQUAÇÃO 6 PARA O MÓDULO DE RUPTURA RESIDUAL DE MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.

ATMOSFERA	TU (%)	B ₀	B ₁	B ₂	TAXA	B ₂ - B ₀
Oxigênio	0	36,49	0,0454	102,24	-1,18	65,8
	12	21,52	0,2614	101,23	-1,42	79,7
	Verde	44,88	0,2787	104,44	-3,00	59,6
Nitrogênio	0	0,0012	-3,3x10 ⁻⁶	101,71	11,00	101,7
	12	32,06	0,1304	104,53	-1,79	72,5
	Verde	42,03	0,3429	105,21	-2,91	63,2
Ar	0	6,19	0,6594	105,29	-0,50	99,1
	12	27,09	0,3335	105,79	-1,87	78,7
	Verde	46,16	0,2569	105,92	-3,04	59,8

FONTE: MITCHELL (1988).

Observa-se pela Figura 17 e equação 6 que a degradação das propriedades da madeira tratada termicamente tende a alcançar um valor limite, que coincide com a região onde os valores praticamente não são alterados, mesmo com o aumento do tempo de exposição. Na Figura 17, por exemplo, observa-se que os valores de MOR residual tendem a serem constantes a partir de 10-11 horas de exposição. Assim, pode-se dizer que a madeira como material resiste à ação do calor, mas o comportamento, ou melhor, a resistência de suas diversas propriedades à bastante distinto entre si (Figura 18).

FIGURA 17 - RELAÇÃO NÃO-LINEAR PARA O MÓDULO DE RUPTURA RESIDUAL DE MADEIRA TRATADA TERMICAMENTE.

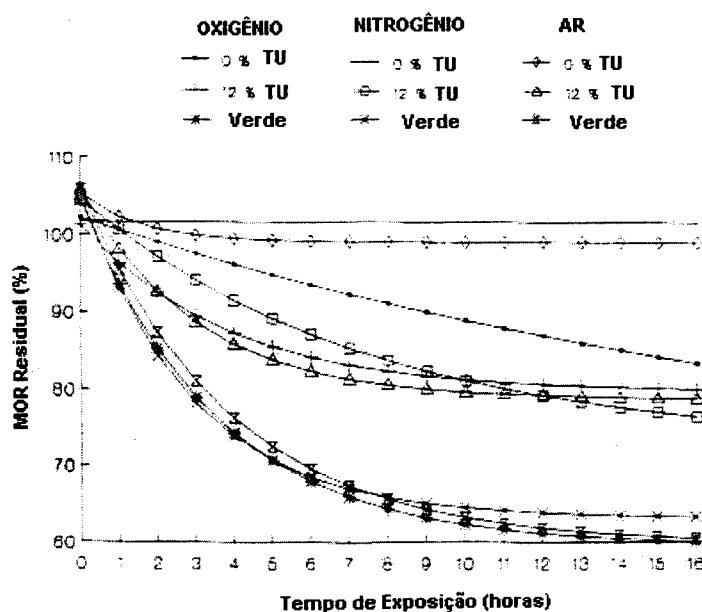
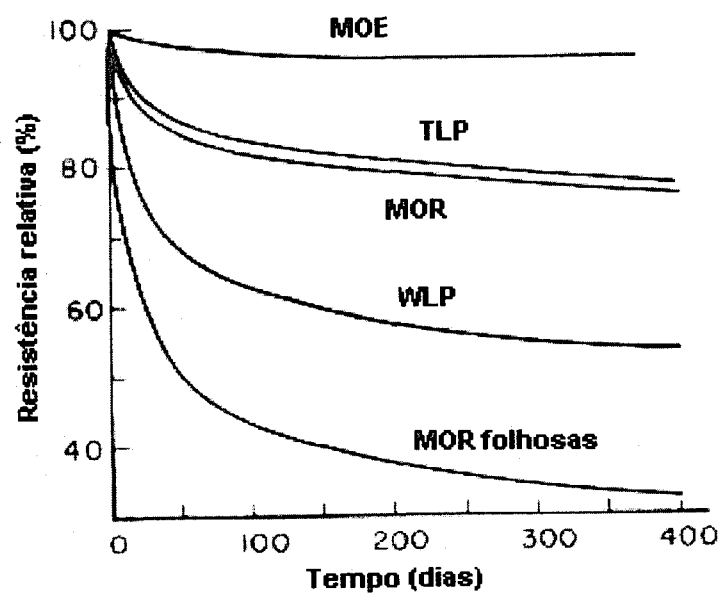


FIGURA 18 - GRAU DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA DE DISTINTAS PROPRIEDADES DA MADEIRA.

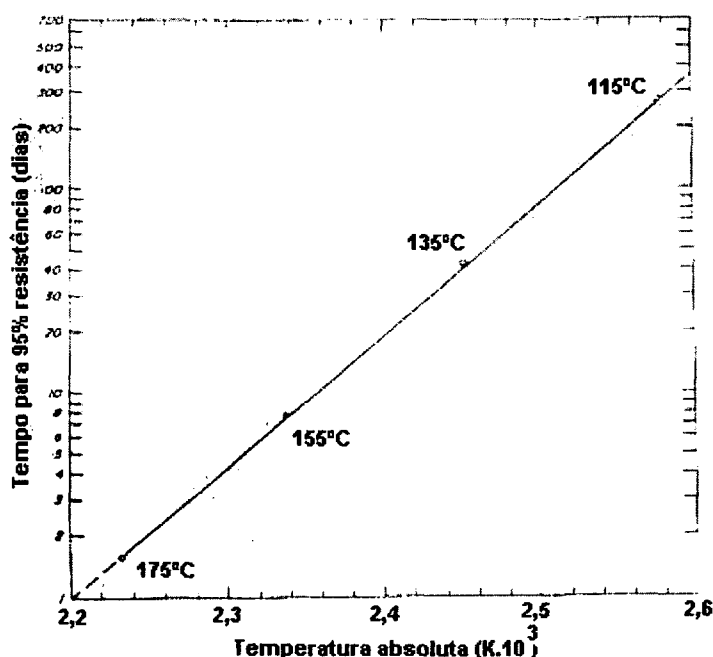


Os dados da Figura 18 foram obtidos pelo tratamento da madeira em água a 94°C e depois condicionada a 12% de TU. Observa-se que o MOE é das propriedades mais resistentes à degradação, seguido pela tensão no limite proporcional, o MOR de coníferas, enquanto que o trabalho no limite proporcional e o MOR de folhosas são os mais sensíveis ao tratamento térmico. Fica evidente que para todas as propriedades existe uma tendência a valores constantes de resistência relativa a partir de um determinado período de aquecimento.

BODIG e JAYNE (1993) apresentam uma equação que permite estimar qual o tempo de aquecimento, em determinada temperatura, reduz a propriedade para 95% do seu valor inicial, ou seja, propriedade residual de 95% (equação 8). A Figura 19 apresenta valores de MOE obtidos segundo esta equação. Na equação, a e b são constantes empíricas para uma propriedade em particular; T é o tempo para atingir 95%, e t é a temperatura absoluta em Kelvins.

$$\log T = a + b \left(\frac{1}{t} \right) \quad (8)$$

FIGURA 19 - TEMPO PARA ATINGIR 95% DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ACORDO COM EQUAÇÃO 8.



FONTE: BODIG e JAYNE (1993)

Recentemente, GREEN et al. (2003) avaliaram o efeito da alta temperatura nas propriedades de flexão de madeira estruturais. Os resultados obtidos foram analisados à luz da equação 8, com o objetivo de estimar qual o tempo necessário para atingir distintas faixas de MOR residual. A Tabela 18 apresenta os resultados. Evidencia-se que em temperatura mais elevada o tempo para atingir um determinado nível de MOR residual é inferior do que aquele em temperatura mais baixa. O tempo necessário para se atingir 50% de MOR residual à 82°C (48,1 anos) é 8 vezes menor do que a 66°C (354,2 anos). No entanto, o resultado obtido pelos autores foi bastante diferente do valor estimado pelo modelo: MOR residual de 0,75 a 0,50 foram obtidos com apenas 3 anos de exposição.

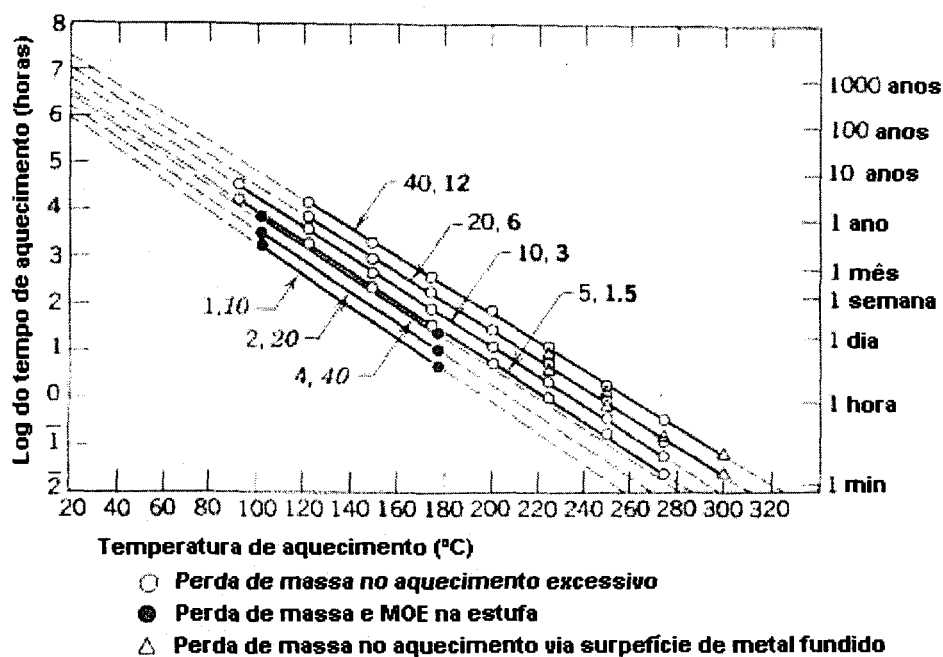
TABELA 18 - TEMPO ESTIMADO (ANOS) PARA MOR RESIDUAL.

MOR RESIDUAL	Log T = a + b/t	TEMPO PARA MOR RESIDUAL	
		82°C	66°C
0,95	- 13,940 + 5925/t	1,5	9,8
0,85	-13,768 + 6063/t	5,4	37,2
0,75	- 13,702 + 6136/t	10,1	71,0
0,65	-13,481 + 6162/t	19,8	141,0
0,50	-13,391 + 6267/t	48,1	354,2

FONTE: GREEN ET AL (2003).

A Figura 20, obtida em STAMM (1964), apresenta a plotagem do logaritmo do tempo de aquecimento versus a temperatura para a perda de massa e de MOR em madeira seca de coníferas. Os dados dão uma boa relação linear que podem ser extrapolados para a temperatura ambiente (linhas tracejadas). O tempo do aquecimento é indicado no lado direito do Gráfico, em várias escalas. Os números com letras normais indicam perda de massa (%) em estufa, os em *itálico* indicam a perda de MOR (%) em estufa, enquanto que os números em **negrito** indicam a perda de massa (%), em aquecimento via superfície de metal fundido.

FIGURA 20 - ESTIMATIVAS DE DEGRADAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES DA MADEIRA.



Analisando-se o Gráfico, observa-se que uma peça de madeira estocada em condições secas à temperatura ambiente durante 100 anos pode perder 1% de sua massa e 10% do seu MOR, e mantidas essas mesmas condições perderia 20% de sua massa em 1000 anos. O autor alerta que infelizmente não é possível confirmar tais previsões, e sendo assim tal Gráfico deve ser observado apenas como uma tendência.

2.3.5.2 Energia de Ativação

Nos parágrafos anteriores viu-se como pode ser calculada e como é importante o conhecimento acerca da taxa de degradação térmica (k). Entretanto, similarmente deve-se proceder ao estudo da energia que o sistema consome para que tais reações ocorram. Essa energia é chamada de energia de ativação (ΔH) e é a quantidade de energia requerida para que as reações degradativas se iniciem na madeira.

Arrhenius desenvolveu a equação 9 que permite calcular a energia de ativação, a partir da taxa constante de degradação (K) e a temperatura T , em Kelvins, sendo que R é a constante do gás, k é uma constante. A equação 10 é a forma diferencial desta equação. Integrando-a obtêm-se a equação 11.

$$K = ke^{-\Delta H / RT} \quad (9)$$

$$-\Delta H = RT^2 \left[\frac{d \ln K}{dT} \right] \quad (10)$$

$$-\Delta H = 2,3 R \left[\frac{(\log K_1 - \log K_2)}{\left(\frac{1}{T_1} \right) - \left(\frac{1}{T_2} \right)} \right] \quad (11)$$

Se o cálculo de ΔH for em calores/moles, então a constante do gás é assumida como sendo 1,987. STAMM (1964) afirma que muitos dados tem sido analisados à luz da equação 11, e que a plotagem do $\log K$ versus $1/T$ quase que invariavelmente produz curvas retilíneas. A inclinação da reta é dada pelo quociente da expressão entre colchetes, sendo assim o cálculo da energia de ativação pode ser feito apenas pela mera multiplicação por 2,3 R .

OTA e MOZAMMEL (2003) estudando a cinética da degradação térmica de da madeira empregou equações distintas para calcular a energia de ativação. Os autores basearam-se na equação 12, proposta por GOLDFARB et al², onde A é um fator preexponencial (min^{-1}); PR é $[(M - M_f)/(M_0 - M_f)]$, sendo M massa no tempo t , M_0 massa inicial e M_f final; e n é a ordem da reação. Linearizando esta equação, tem-se a equação 13 que é múltipla do tipo $z = a + bx + cy$ onde a é $\log A$, b é ΔH e c é n .

² GOLDFARB, J.; MCGUCHAN, R.; MEEKS, A.C. **Kinetics analysis of termogravimetry. Part II. Programmed temperatures.** Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson AFB, 68-181. 1968.

$$-\frac{dPR}{dt} = A e^{-\Delta H / RT} (PR)^n \quad (12)$$

$$\log \left[-\frac{1}{M_0 - M_f} \frac{dw}{dt} \right] = \log A - \frac{\Delta H}{2,3RT} + n \log \left[\frac{M - M_f}{M_0 - M_f} \right] \quad (13)$$
$$z = a + b x + c y$$

A Tabela 19 apresenta os parâmetros cinéticos calculados pelos autores por meio da equação 13. Observa-se que, que as energias de ativação calculadas, foram bem diferentes dos valores usuais apresentados por STAMM (1964), na faixa de 10.000 a 50.000 cal/mol, e que as reações desenvolvidas não são exatamente como de 1ª ordem. De fato, como discutido anteriormente, as reações de decomposição térmica são assumidas como sendo de 1ª ordem, mas alguns autores ocasionalmente mencionam-nas como sendo de pseudo 1ª ordem (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1986; BEALL e EICKNER, 1970). Os autores desse estudo infelizmente não analisam criticamente estes resultados obtidos.

TABELA 19 - ENERGIA DE ATIVAÇÃO (ΔH) PARA A DEGRADAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES.

ESPÉCIES	MASSA RESIDUAL (%)	PARÂMETROS CINÉTICOS		
		Log A	ΔH (cal/mol)	ORDEM (n)
Cedar	25,56	-1,12	1.800	0,71
Cypress	18,92	-1,19	2.000	0,64
Fir	25,82	-1,81	684	0,44
Spruce	18,90	-1,19	1.880	0,63

FONTE: OTA e MOZAMMEL (2003).

A Tabela 20 apresenta ΔH para algumas propriedades de distintos materiais. Observa-se que ΔH calculada para perda de massa é próxima daquela calculada para as demais propriedades, dadas as mesmas condições. Evidencia-se também que a energia necessária para iniciar a degradação térmica pelo vapor é inferior àquela necessária em condições secas. As energias de ativação para os três principais compostos também não são coincidentes entre si, indicando que as cinéticas das reações de degradação são distintas.

Entretanto, as taxas de degradação (k) são distintas entre as diversas propriedades. Isto indica, por exemplo, que a presença de catalisadores pode acelerar a taxa de degradação, mas, no entanto, não tem efeito sobre a natureza da reação (STAMM, 1964).

TABELA 20 - ENERGIA DE ATIVAÇÃO (ΔH) PARA A DEGRADAÇÃO DE ALGUMAS PROPRIEDADES.

MATERIAL	PROPRIEDADE	TEMPERATURA (°C) CONDIÇÕES	ΔH (cal/mol)	REFERÊNCIA
Tábua de pinus	Massa	93,5-250 (estufa; 1 hora -2,4 anos)	29.500	1
Lâmina sitka spruce	Massa	167-300 (metal fundido; 1 min -6 dias)	29.800	1
Caibros diversos	Módulo de ruptura	102-177 (estufa; 1 hora a 188 dias)	26.600	1
Caibros diversos	Módulo de ruptura	121-177 (vapor 1 -32 horas)	16.300	1
Caibros diversos	Trabalho na carga máxima	102-177 (estufa; 1 hora a 188 dias)	28.600	1
Madeira	Massa	248-310 (estufa)	31.000	2
Celulose	Massa	300-380	57.990	2
Celulose	Cristalinidade	180-220 (banho óleo; madeira úmida)	44.150	3
Celulose	Cristalinidade	180-220 (estufa; madeira úmida)	47.700	3
Celulose	Cristalinidade	240-300 (Estufa; ar)	16.900	4
Hemicelulose	Massa	-	46.000	4
Hemicelulose	Massa	100-500 (ar)	30.000	5
Lignina	Massa	100-500 (ar)	23.400	5

REFERÊNCIA: (1) STAMM (1964); (2) FENGEL e WEGENER (1989); (3) BHUIYAN ET AL. (2000); (4) BEALL e EICKNER (1970); (5) WENZL (1970).

Segundo STAMM (1964), a única variável que pode afetar ΔH é a umidade. O aquecimento da madeira, em ambiente a 95% de umidade ou em vapor, reduz ΔH à metade do valor obtido em ambiente seco, além de aumentar a taxa de degradação (k). TOMASELLI (1977), em sua revisão, relata que a degradação das propriedades é mais pronunciada em ambientes de alta umidade ou em vapor, e isso se deve provavelmente ao fato de que as taxas de hidrólise são maiores com o aumento da concentração de vapor, especialmente quando se empregam temperaturas mais elevadas.

2.3.5.3 Curso da Degradação Térmica da Madeira

A madeira quando exposta a uma fonte de calor constante de elevada temperatura e por um período relativamente longo estará sujeita a dois fenômenos químicos consecutivos (IPT, 1986):

- a) Pirólise da madeira: transformação dos constituintes da madeira de elevado peso molecular, por meio da degradação térmica, em compostos de reduzido peso molecular;
- b) Combustão dos produtos da pirólise: oxidação, pelo oxigênio do ar, das substâncias geradas na etapa anterior.

Quando uma peça de madeira é exposta a uma fonte de calor, tem sua superfície aquecida seja por irradiação, convecção ou condução. Devido às suas características físicas tais como, baixa condutividade térmica, baixa massa específica e elevado calor específico, são formadas zonas isotérmicas (T_0 , T_1 , T_2 , T_3 , etc), que terão a forma definida pela superfície exposta ao aquecimento e ainda serão paralelas (Figura 21, A).

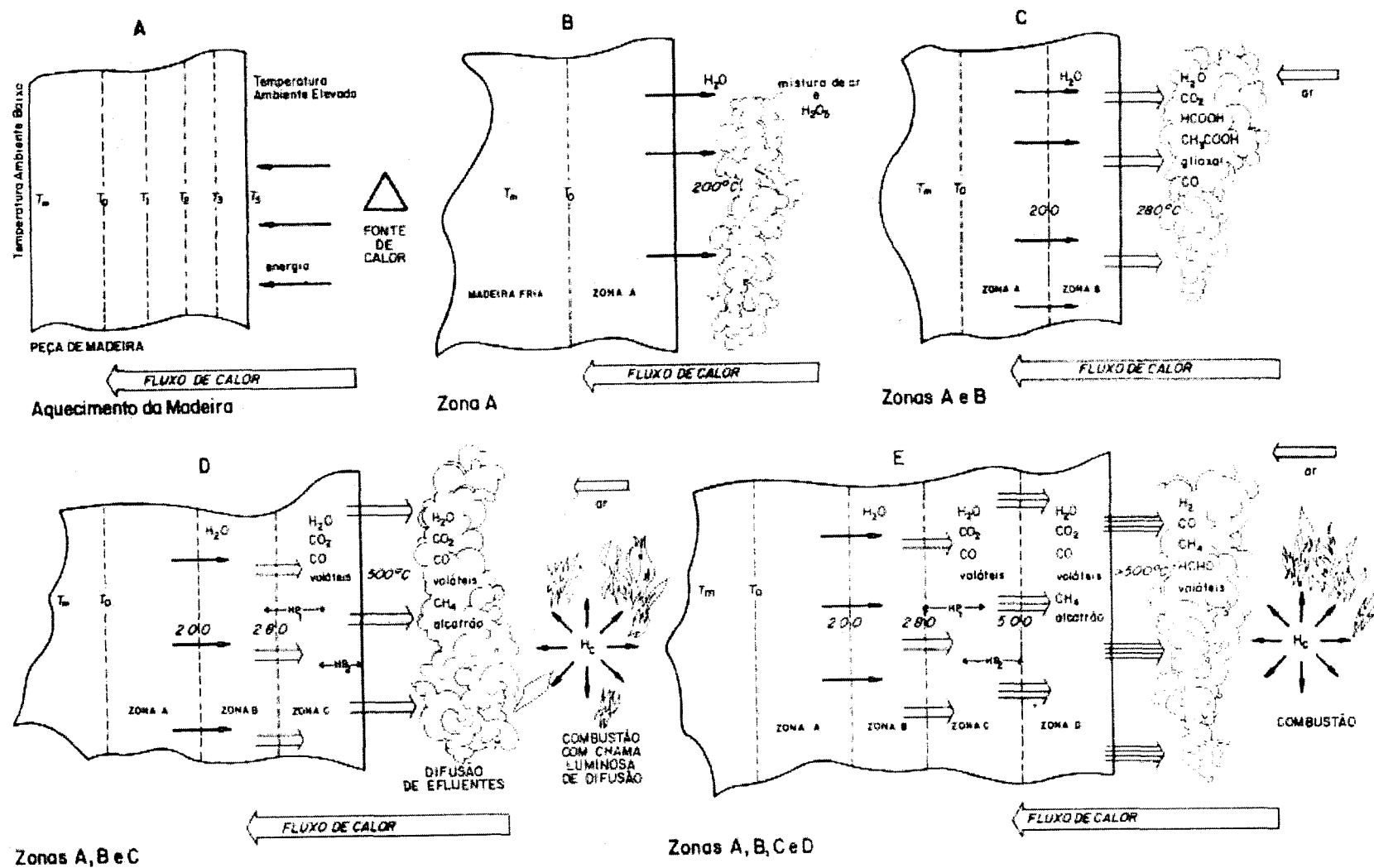


FIGURA 21 - ETAPAS DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA (IPT, 1986).

No decorrer do aquecimento, estas isotermas irão avançar pela peça de madeira no sentido do fluxo de calor, até que a temperatura do meio, se equilibre com a da fonte de calor. A presença de água na madeira aumenta a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura da madeira, pois parte dela será consumida para realizar a evaporação da água. Por outro lado, a água aumenta a condutividade térmica da madeira, e conseqüentemente aumentando o fluxo de calor pela região úmida.

O avanço da isoterma T_0 , cuja temperatura é pouco acima da temperatura da madeira, cria uma região cuja temperatura está compreendida entre T_0 e 200°C , denominada zona A. Nesta região, observa-se a evolução de vapor de água e traços de gás carbônico, ácido fórmico e ácido acético. Tem-se basicamente a secagem da madeira. Considerando-se que na superfície da madeira origina-se uma região rica em vapor de água, e que do centro da peça haverá um fluxo de vapor de água, que se pode admitir, expulsa o ar e o impede de penetrar na peça (Figura 21, B). Portanto, no interior da peça de madeira ocorrerão apenas reações de hidrólise e pirólise, uma vez que não há oxigênio para as reações de combustão.

Mantido o aquecimento externo, a temperatura da peça de madeira eleva-se até 280°C , e conseqüentemente as isotermas T_0 e 200°C deslocam-se para o interior da peça. A região entre as isotermas de 200 e 280°C é denominada zona B. Nesta zona B ocorre pirólise suave da madeira, com caráter endotérmico, e com a liberação de vapor de água, dióxido de carbono e ácidos fórmico e acético, e em menor proporção monóxido de carbono. Estes produtos saem misturados com os originados na zona A, e há uma perda de massa de madeira superior a 10%.

Se o fluxo de calor externo é mantido, a isoterma T_0 avança ainda mais, concomitantemente, também as de 200 e 280°C . A superfície da madeira chega a atingir 500°C , formando assim a zona C, que vai de 280 a 500°C (Figura 21, D). Nesta zona, a pirólise da madeira tem caráter endotérmico, uma vez que a degradação da lignina e da celulose demanda energia para que ocorra. No entanto,

a partir de 320°C, de um modo geral tem-se lugar reações exotérmicas, ocasionada principalmente em função da pirólise da lignina.

Deste modo, tem-se na zona C um incremento da quantidade de calor fornecido às regiões mais frias da peça de madeira, e sua temperatura cresce rapidamente. A degradação térmica nesta zona gera: monóxido de carbono, metano, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol e hidrogênio que fluem do sistema, diluídos com os produtos da pirólise das zonas A e B. Tem-se também a perda de uma grande quantidade de massa, sendo superior a 60%, e cuja massa sólida resultante denomina-se carvão vegetal.

A temperatura da peça de madeira eleva-se acima de 500°C e as isothermas T_0 , 200, 280 e de 500°C, deslocam-se ainda mais no sentido do fluxo do calor. A região entre a isoterma de 500°C e a superfície acima de 500°C é denominada zona D. Os produtos das zonas A, B e C sofrem, na zona D, reações secundárias mais energéticas que as da zona C. Os alcatrões e produtos voláteis da zona C sofrem pirólise, formando produtos altamente combustíveis, enquanto produtos inertes como água e dióxido de carbono, reagem com o carvão para formar monóxido de carbono, hidrogênio e formaldeído. Em termos de cinética química, a pirólise da madeira pode ser representada, por uma reação unimolecular de pseudo 1ª ordem.

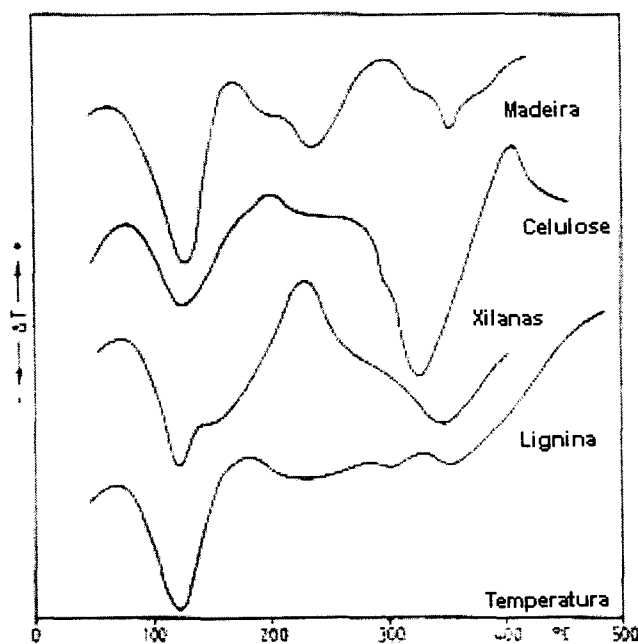
2.3.5.4 Análise Térmica da Madeira e de seus Componentes

O método mais empregado para estudar as reações originadas pela ação do calor é a análise térmica diferencial (*differential thermal analysis*, DTA). Esse método permite avaliar as reações térmicas causadas em uma peça de madeira quando aquecida a taxas de incremento constantes (FENGEL e WEGENER, 1989). No DTA, o material é analisado por meio de equipamentos térmicos com câmaras onde a degradação térmica desenvolve-se, podendo-se controlar a taxa de aquecimento, a temperatura final e o tipo de atmosfera.

No método DTA são traçados termogramas que permitem estudar se as reações químicas que se processam, nas diversas faixas de temperaturas, durante o aquecimento da madeira são consumidoras de energia (endotérmicas) ou liberadoras de calor (exotérmicas).

A Figura 22 apresenta o termograma de *Fagus sylvatica* e de seus componentes químicos básicos. Observa-se que existem picos de reações endotérmicas ($\Delta T -$) na faixa que de 120-150°C, que são atribuídos à energia necessária para evaporação da água presente na madeira. Por outro lado, observa-se que há picos de reações exotérmicas ($\Delta T +$) nas faixas de 200-250°C e 280-320°C, bem como acima de 400°C que são atribuídos à energia liberada pela degradação térmica dos componentes da madeira. Assim, essas observações estão de acordo com o observado e relatado a cerca do curso da degradação térmica.

FIGURA 22 - TERMOGRAMAS PARA MADEIRA E COMPOSTOS QUÍMICOS DE *FAGUS SYLVATICA*.



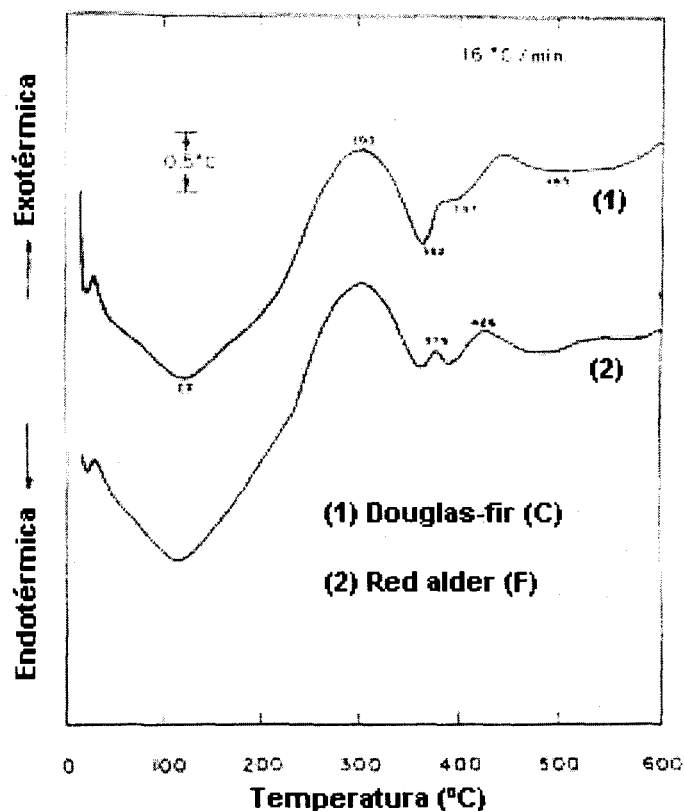
FONTE: MITCHELL (1988).

CHOW e PICKLES (1971) revisando estudos sobre degradação térmica da madeira afirmam que, picos endotérmicos na faixa de 110-130°C são oriundos do calor de absorção da água na madeira. Entretanto, a formação de picos exotérmicos na faixa de 170-210°C, como observados na Figura 22, aparentemente é inconsistente.

Os autores afirmam que estudos têm atribuído esses picos ao calor de formação de anidrocélulose a partir de compostos celulósicos, enquanto outros têm atribuído à condensação primária de macromoléculas dos componentes da madeira. Por outro lado, os picos exotérmicos a 220°C são atribuídos à quebra da ligação do glicosídeo das xilanas, enquanto que o pico a 240°C, é atribuído à quebra das ligninas de cadeias pequenas, formando a vanilina. Os picos endo e exotérmicos observados no termograma da madeira podem ser deduzidos, dentro de certos limites, a partir dos picos observados nos termogramas dos componentes isolados da madeira. Em função da diferença na composição química da madeira, observa-se comportamentos distintos entre coníferas e folhosas por meio da DTA.

A Figura 23, obtida em CHOW e PICKLES (1971), mostra os termogramas para a madeira de douglas-fir, uma conífera, e de red alder, uma folhosa. A principal diferença observada entre os termogramas se refere aos picos endotérmicos ocorrentes a 360 e 395°C. A intensidade do pico de 360°C (douglas-fir) é muito mais forte que a 395°C, enquanto que para o red alder não existe tal diferenciação.

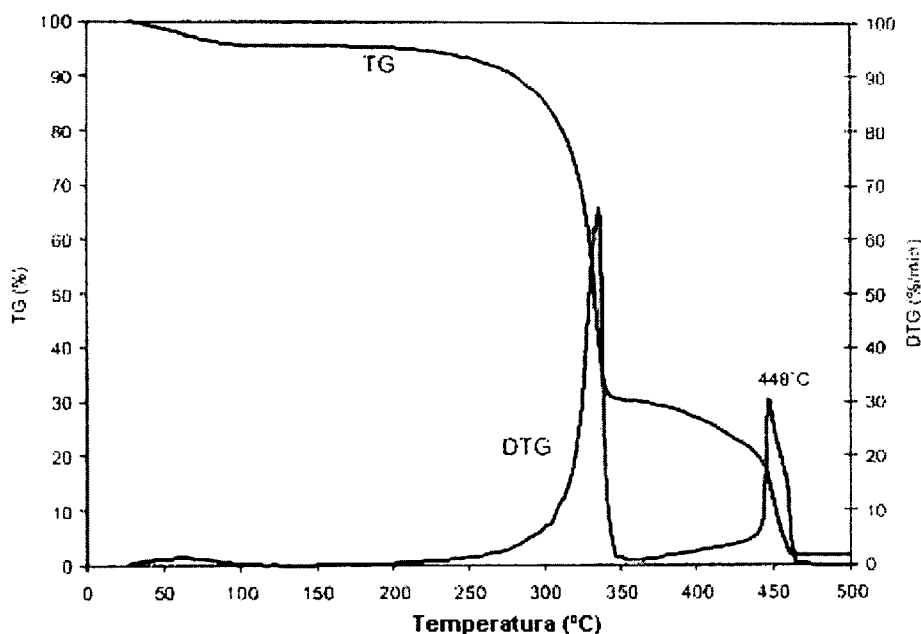
FIGURA 23 - TERMOGRAMAS PARA MADEIRA DOUGLAS-FIR E RED ALDER.



FONTE: CHOW e PICKLES (1971)

Um outro método bastante empregado é a análise termogravimétrica (TG). Neste tipo de análise o enfoque é basicamente a perda de massa do material submetido à degradação térmica. Assim, é possível acompanhar a massa residual do material com o desenvolvimento da decomposição térmica. Pode-se também acompanhar a taxa de perda de massa com o tempo (%/min), definida como análise termogravimétrica diferencial (DTG). No TG/DTG, também é possível se controlar as variáveis do processo, tal como no DTA.

A Figura 24 apresenta um Gráfico típico obtido por meio da análise TG/DTG. Analisando-se essas curvas observa-se que a degradação do material pode ocorrer em duas etapas (depressão de TG): a primeira é devido principalmente à celulose e hemicelulose, e a segunda geralmente é atribuída à perda de massa da lignina.

FIGURA 24 - CURVAS TG E DTG PARA MADEIRA DE *PINUS PINASTER*.

FONTE: NEGRO ET AL. (2003)

Na curva de TG observa-se uma primeira queda iniciando-se a 50°C até atingir 100°C, para a partir daí manter-se constante até 200-220°C. Deste ponto até 350°C observa-se uma queda acentuada da massa do material, que coincide com o 1º pico da curva DTG. Isso significa que é nessa faixa, 220-350°C, que a taxa de degradação térmica, ou seja, a perda de massa por minuto, é mais intensa, que segundo os autores está relacionada à degradação da hemicelulose e da lignina. Na faixa de 350-450°C observa-se, uma perda de massa menos acentuada, para a partir desse ponto ocorrer novamente uma queda acentuada, coincidindo novamente com o pico de DTG. Assume-se que esse pico é devido à degradação da lignina.

Hemicelulose

Dentre os componentes químicos da madeira, a hemicelulose é o menos estudado. São os compostos menos estáveis frente ao tratamento térmico, sendo que sua degradação pode se iniciar. Sua degradação produz mais gases e menos alcatrão que a degradação da celulose, sendo que este último destilado é não

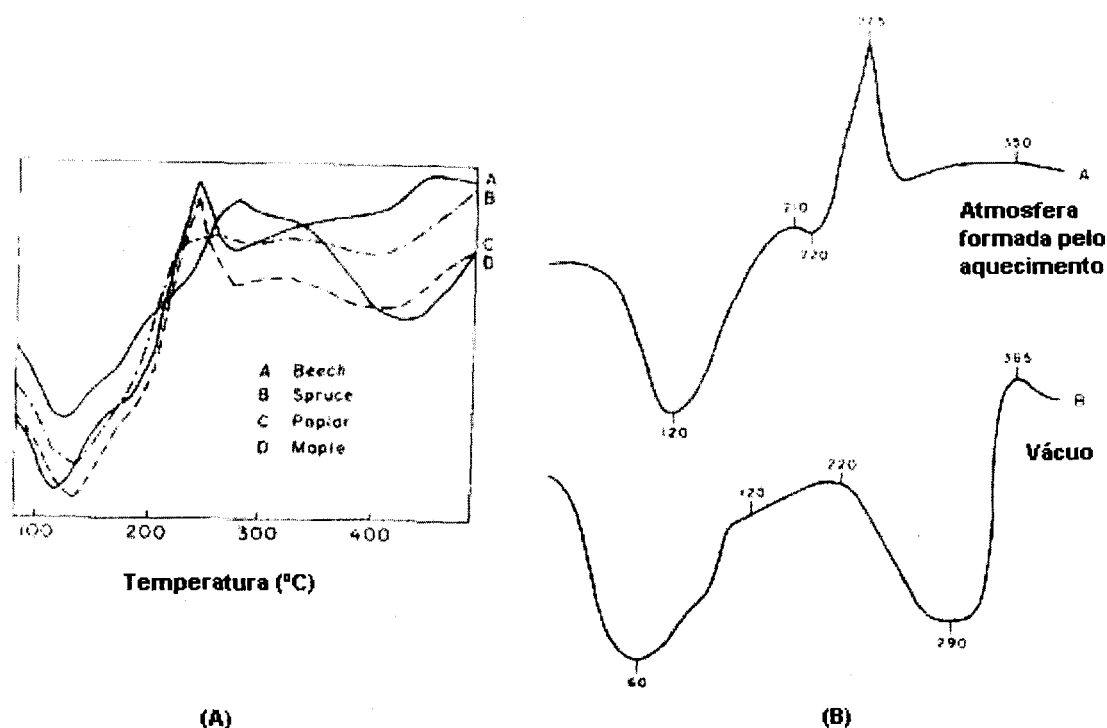
contém levoglicosana. A principal hemicelulose ocorrente em madeira de folhosas são as pentosanas, enquanto que para coníferas são quase que totalmente hexosanas.

O ácido acético é formado pela decomposição térmica dos três principais componentes químicos da madeira. Entretanto, acredita-se que a maior parte do ácido acético produzido é oriundo das hemiceluloses. As pentoses, que originam a xilana (hemicelulose predominante nas folhosas), sob ação da temperatura formam também o furfural, que pode sofrer descarbonilação formando assim o furano. Outros produtos da pirólise das xilanas são: acetaldeído, metanol, dióxido de carbono, água, alcatrão, entre outros.

Estudos de DTA das hemiceluloses têm demonstrado que a retirada da água higroscópica é muito mais difícil que na celulose, provocando assim, picos endotérmicos em temperaturas na faixa de 90 a 130°C. Observa-se também a formação de um platô entre 175-210°C que precede as reações exotérmicas primárias. A decomposição completa-se por volta de 270°C, e é seguido de um aquecimento da massa residual até 330°C. Após este ponto, observa-se uma profunda depressão, que é atribuída às reações endotérmicas secundárias. De um modo geral, na DTA e hemiceluloses observa-se um total de quatro picos endotérmicos e três exotérmicos.

Na Figura 25 são apresentados termogramas para hemiceluloses obtidos em BEALL e EICKNER (1970). Observa-se em (A) reações endotérmicas iniciais, que representam a perda de água higroscópica. A partir de 180°C iniciam-se reações exotérmicas que atingem o pico em 255°C. Acima de 300°C o comportamento exotérmico é evidente, mas em menor grau. Os autores concluem que as hemiceluloses são os compostos menos estáveis termicamente, que isto se deve, provavelmente a sua natureza mais amorfa que a da celulose.

FIGURA 25 - TERMOGRAMAS DE HEMICELULOSES ISOLADAS DE 4 ESPÉCIES DE MADEIRA (A) E DE XILANA ISOLADA DE FOLHOSA (B).



FONTE: BEALL e EICKNER (1970)

Pode ser observado em (B) que a decomposição de xilanas é dependente do meio no qual se processa o aquecimento. À pressão normal a decomposição se inicia a 200°C com um pico endotérmico a 220°C. Acima de 225°C iniciam-se rapidamente reações exotérmicas, cujo pico situa-se entre 275-290°C, de fragmentação e produção de gases. Os fragmentos são desidratados, produzindo furfural. Acima de 300°C outras reações secundárias têm lugar. Por outro lado, sob o vácuo, a produção de furfural é aparentemente retardada por causa do entrelaçamento. Observa-se uma rápida decomposição a partir de 220°C, com quebra das ligações C-O-C, e formando compostos anidros. A profunda reação endotérmica entre 250-300°C é resultado da evaporação destes compostos.

Celulose

Nas investigações sobre a decomposição térmica da madeira, a celulose tem sido o componente mais freqüentemente estudado. Os estudos enfocam o desenvolvimento de retardantes de fogo, a determinação de parâmetros da pirólise, o relacionamento entre o comportamento da celulose e o da madeira durante a pirólise, entre outros. De um modo geral nos termogramas para a celulose se observa picos, endo e exotérmicos, e platôs da seguinte forma (BEALL e EICKNER, 1970):

- a) 95-100°C: pico endotérmico; evaporação da água higroscópica;
- b) 155-259°C: platô; aquecimento sem quebra das ligações;
- c) 259-389°C, até 414°C, e até 452°C: quebra da macromoléculas da celulose; taxas acentuadas entre 299-389°C;
- d) 452-500: platô; formações de substâncias estáveis;
- e) 500-524°C: pico endotérmico; complementação das reações.

Quando a madeira é submetida ao aquecimento e sua temperatura atinge o valor necessário para que se inicie a pirólise da celulose, haverá presente no meio, água e ácidos provenientes da pirólise das hemiceluloses e por estes motivos a sua degradação ocorre por dois mecanismos químicos simultâneos: a hidrólise ácida e a pirólise.

Na cisão hidrolítica formam-se novos grupos terminais com as novas cadeias celulósicas formadas, sendo que um destes terminais é redutor (possui uma carbonila) e o outro é não redutor (o carbono da carbonila é compartilhado com o restante da cadeia). O resíduo com terminal redutor, após outras reações, produz glicose, que exposta à temperatura elevada, é desidratada formando assim a α -glicosana para daí dar origem a levoglicosana.

Na pirólise da celulose há também cisão termolítica das ligações carbono-oxigênio, e caso ocorra entre o carbono um e o oxigênio das ligações entre ciclos levará a formação da levoglicosana. Se por outro lado, a cisão for entre o carbono quatro (ao invés do um) e o átomo de oxigênio, não haverá formação de levoglicosana.

Deste modo, quando a celulose atinge 300°C, seu grau de polimerização que inicialmente é de 5000, é bastante reduzido, ou seja, a passa por uma severa despolimerização. Além disso, os produtos originados na pirólise primária da celulose passam por uma pirólise secundária, sendo que a levoglicosana produzida, se aquecida acima de 270°C, decompõe-se em água, formaldeído, ácido acético e fenóis. Por sua vez, os produtos da pirólise secundária, em temperaturas mais elevadas, sofrem decomposição produzindo uma nova série de produtos, tais como: formaldeídos, hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono.

BEALL e EICKNER (1970) citam estudos que abordaram os mecanismos de degradação térmica da celulose. Segundo esses estudos, entre 200-280°C ocorre a desidratação da celulose; a partir daí até 340°C, ocorrem também reações de despolimerização; e em seguida a decomposição da celulose desidratada em gases e resíduos de carvão via reações exotérmicas.

Lignina

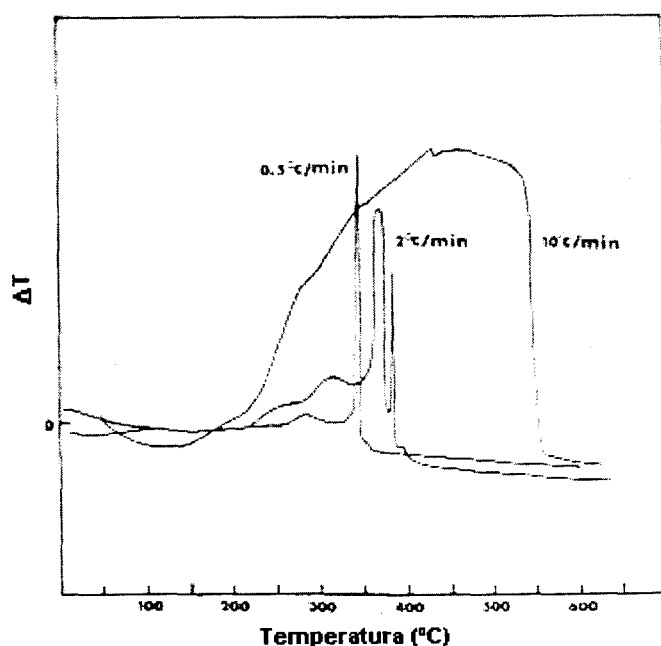
Muito pouca informação está disponível acerca da degradação térmica da lignina por meio de termogramas. Sabe-se, no entanto, que é o componente químico mais estável da madeira, a sua degradação inicia-se apenas a partir de 250°C, sendo sua taxa equivalente à metade da observada para a madeira. Como ocorre na celulose, a degradação da lignina pode ocorrer tanto por cisão termolítica, quanto por cisão hidrolítica. A hidrólise ocorre por ação da água gerada nos primeiros estágios da pirólise e produz os seguintes produtos:

- a) Gases: monóxido e dióxido de carbono, metano e etano;
- b) Condensáveis: água, ácidos acético e fórmico, e metanol;
- c) Alcatrões: fenol, guaiacol, aldeídos, cetol, xilenóis,

WALKER (1993) chama de autohidrólise, o processo no qual os ácidos produzidos pela degradação térmica da madeira catalisam as reações de hidrólise, ou sejam, reagindo com a madeira propriamente dita. Assim, podem ocorrer reações hidrolíticas por ação de produtos gerados nas etapas posteriores, que passam a ocorrer simultaneamente com as reações termolíticas.

A Figura 26 mostra termogramas da lignina para três taxas de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Os dados foram obtidos em NASSAR e MacKAY (1984). Os autores observaram que as reações endotérmicas iniciam-se a 50°C e terminam por volta de $130\text{-}170^{\circ}\text{C}$, dependendo da taxa de aquecimento. Maiores taxas, implicam na finalização das reações em temperaturas mais baixas.

FIGURA 26 - TERMOGRAMAS DE LIGNINA DE ACORDO COM A TAXA DE AQUECIMENTO.



FONTE: NASSAR e MacKAY (1984)

As reações exotérmicas apresentam picos que são distintos segundo a taxa de aquecimento. A $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ observa-se apenas um pico exotérmico muito curto a $330\text{-}350^{\circ}\text{C}$, e em seguida reiniciam-se reações endotérmicas. Por outro lado, à taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ primeiro pico inicia-se entre $220\text{-}240^{\circ}\text{C}$ e estende-se até 540°C .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Os painéis de partículas orientadas (OSB) utilizados nesse trabalho foram cedidos pela empresa Masisa S.A. localizada no município de Ponta Grossa (PR). Foram enviados 45 de painéis OSB produzidos pela empresa, obtidos aleatoriamente de seu estoque. As amostras foram retiradas de painéis comerciais (2,44 m x 1,22 m) na dimensão de 50 x 50 cm e espessura nominal de 12,7 mm, massa específica de 640 kg/m^3 , produzidas com madeira de *Pinus* sp. A quantidade de adesivo empregado foi de $19,04 \text{ kg/m}^3$, sendo 60% de resina fenólica, para camadas externas, e 40% de resina à base de isocianato, para camada interna, e também 230 g/m^3 de parafina sólida e 40 ml/m^3 de inseticida. Os painéis recebidos foram medidos, pesados para determinação de sua massa específica (ME) e colocados em câmara climática até o momento de aplicação do tratamento térmico.

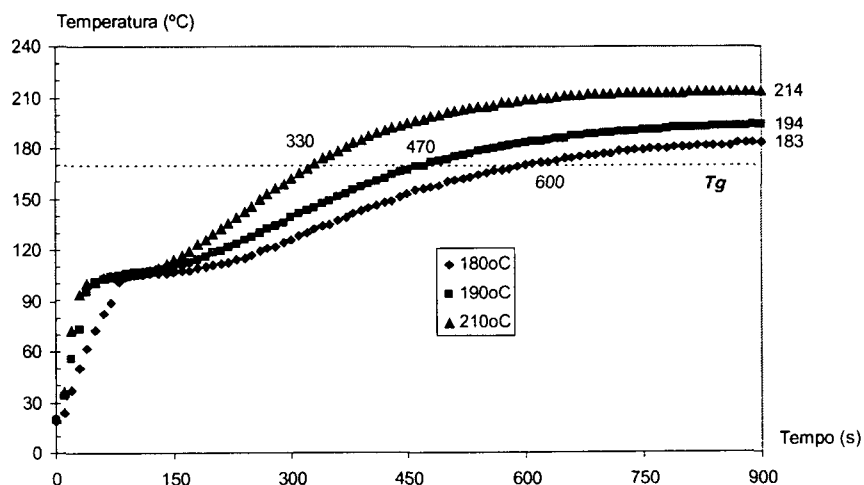
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico foi feito empregando-se prensa de laboratório com controle de temperatura e pressão. Os painéis foram colocados na prensa em temperatura e tempo que foram previamente definidos (ver item 3.3). Durante o tratamento a pressão foi aplicada apenas para prover o contato entre os pratos da prensa e o painel. A temperatura interna dos painéis durante o tratamento foi anotada em intervalos de 5 segundos. Para tanto, foi feito um orifício de 8 cm de profundidade e 2 mm de espessura na borda do painel, por onde foi introduzido um termopar tipo J conectado a um multímetro-termômetro Minipa. Antes do tratamento térmico foi retirada uma amostra de 5 x 5 cm de para a determinação do teor de umidade (TU) corrente no momento do tratamento (Figura 27).

3.3 DEFINIÇÃO DE TEMPO E TEMPERATURA

Para definição do tempo e temperatura do tratamento térmico foi feito um ensaio piloto, utilizando-se três dos painéis recebidos, para se avaliar o comportamento dos painéis em relação ao aquecimento, ou seja, qual seria o tempo necessário para que o painel atingisse 170°C para proporcionar a liberação das tensões internas. Assim foi definido que essa seria a temperatura mínima de tratamento. Por outro lado, a temperatura usual de prensagem de painéis oscila entre 200 a 220°C, o que determinou então a temperatura máxima de 220°C. Assim, foi determinado que o ensaio piloto seria feito nas temperaturas de 180°C, 190°C e 210°C, ou seja, em temperaturas ligeiramente superiores ao mínimo exigido, e ligeiramente inferiores ao máximo empregado na indústria. O Gráfico 1 apresenta as curvas de aquecimento dos painéis para cada faixa de temperatura empregada.

GRÁFICO 1 - CURVAS DE AQUECIMENTO DOS PAINÉIS NO ENSAIO PILOTO.



Nota: Tg = temperatura de transição viscoelástica (170°C).

Observa-se por este Gráfico que na temperatura de 180°C são necessários 600 s para que o painel atinja a temperatura desejada, e que este tempo é reduzido à medida que a temperatura de tratamento passa para 190°C (470 s) e 210°C (330 s). Deste modo, optou-se por empregar duas temperaturas para o tratamento térmico: 190°C e 220°C.

Como a temperatura limitante era a de 190°C, admitiu-se que o tempo mínimo deveria ser em função do tempo requerido para o painel atingir 170°C (temperatura de transição viscoelástica, T_g), ou seja, 470 s (\cong 8 minutos) nesta temperatura. Por outro lado, era necessário que esta condição se mantivesse por um período para que as tensões internas fossem liberadas paulatinamente. Convencionou-se então que o tempo mínimo de tratamento seria de 12 minutos e o máximo de 20, e tempo intermediário de 16 minutos.

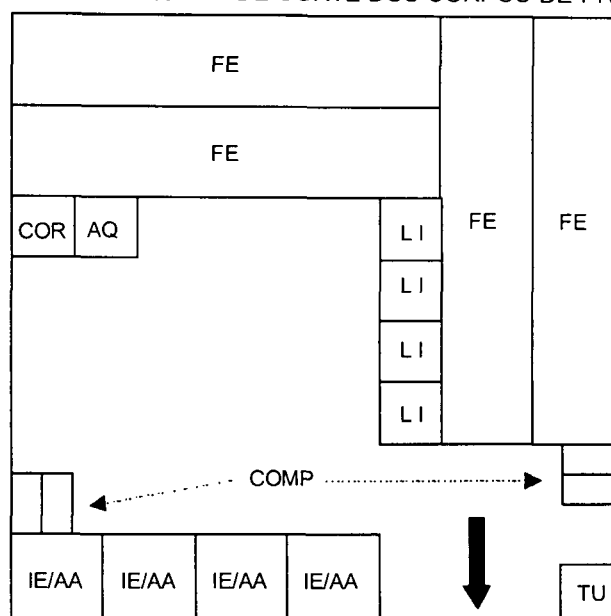
3.4 PROPRIEDADES DOS PAINÉIS

Após o tratamento térmico os painéis foram dispostos na climatização até que atingirem massa constante. Em seguida foi feita a caracterização dos mesmos através da determinação de suas propriedades físicas, mecânicas, colorimétricas e químicas.

3.4.1 Obtenção dos Corpos-de-prova

A Figura 27 apresenta o esquema de corte dos painéis para obtenção dos corpos-de-prova (CP) destinados aos ensaios físicos, mecânicos, químicos e colorimétricos.

FIGURA 27 - ESQUEMA DE CORTE DOS CORPOS-DE-PROVA.



NOTA: FE: flexão estática; LI: ligação interna; COMP: compressão; AQ: análise química; COR: colorimetria; IE: inchamento em espessura; ABS: absorção de água; TU: teor de umidade.

3.4.2 Propriedades Físicas

As propriedades físicas determinadas nos painéis foram inchamento em espessura e absorção de água em 2 (IE2H, ABS2H) e 24 horas (IE24H, ABS24H), teor de umidade de equilíbrio (TUE), taxa de não retorno em espessura (TNRE), massa específica após o tratamento (ME_{TRAT}) e teor de umidade (TU), cortados segundo o esquema da Figura 27 e sumarizadas no Quadro 1.

QUADRO 1 - PROPRIEDADES FÍSICAS ANALISADAS NOS PAINÉIS OSB.

PROPRIEDADES	SIGLA	UNIDADE	N.º CP
Teor de umidade inicial dos painéis	TU _{INC}	%	1
Massa específica inicial dos painéis	ME _{INC}	g/cm ³	1
Teor de umidade de equilíbrio	TUE	%	4
Massa específica após tratamento	ME _{TRAT}	g/cm ³	1
Perda de massa após o tratamento	PMAT	%	1
Perda definitiva de massa após o tratamento	PDMAT	%	1
Inchamento em espessura em 2 horas	IE2H	%	4
Inchamento em espessura em 24 horas	IE24H	%	4
Absorção de água em 2 horas	ABS2H	%	4
Absorção de água em 24 horas	ABS24H	%	4
Taxa de não-retorno em espessura	TNRE	%	4

Os ensaios de IE e ABS foram determinados de acordo com a norma ASTM D1037 (1998) com redução na dimensão dos CP para 7,6 x 7,6 cm. Para cada ensaio foram obtidos quatro corpos-de-prova (CP). Os dados obtidos foram utilizados para determinar a eficiência do tratamento térmico em melhorar a estabilidade dimensional, de acordo com a equação 14, dada por ROWELL e YOUNGS (1981).

$$Ef = \left(\frac{Pnt - Ppt}{Pnt} \right) \times 100 \quad (14)$$

Onde:

Ef = eficiência do tratamento, %;

Pnt = propriedade do painel não-tratado;

Pt = propriedade do painel tratado.

A TNRE (equação 15) foi a relação entre a espessura do CP antes e após o ensaio de IE. Para tanto, após o ensaio de IE, os CPs foram reconduzidos à climatização onde permaneceram até atingir massa constante. Ao final, foram novamente medidos para que se pudesse calcular a espessura final do CP. Em seguida foram secos em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ para se determinar o teor de umidade de equilíbrio (TUE).

$$TNRE = \left(\frac{E_{final} - E_{inicial}}{E_{inicial}} \right) \times 100 \quad (15)$$

Onde:

TNRE = taxa de não retorno em espessura, %;

E_{final} = espessura final após ensaio IE e climatização, mm;

$E_{inicial}$ = espessura inicial antes ensaio IE, mm;

Para cada um dos painéis foi determinada também a perda de massa após o tratamento (PMAT) que foi a relação entre a massa inicial e a massa do painel imediatamente após o tratamento térmico (equação 16). Após a climatização dos painéis até peso constante, estes foram novamente pesados para se determinar agora a perda definitiva de massa após o tratamento (PDMAT).

$$PMAT = \left(\frac{M_{final} - M_{inicial}}{M_{inicial}} \right) \times 100 \quad (16)$$

Onde:

PMAT = perda definitiva de massa, %;

M_{final} = massa após tratamento e climatização, g;

$M_{inicial}$ = massa do painel antes do tratamento, g;

3.4.3 Propriedades Mecânicas

O comportamento mecânico dos painéis foi determinado através de ensaios de flexão estática (FE), compressão (COMP) e ligação interna (LI), conduzidos segundo a norma ASTM D1037 (1998). No ensaio de FE foi possível determinar o módulo de ruptura (MOR), o módulo de elasticidade (MOE) e a força máxima (FM), e o número de CPs foi igualmente dividido entre os sentidos perpendicular e paralelo dos painéis (MOR \perp , MOE \perp , FM \perp , MOR//, MOE//, FM//). A mesma divisão foi feita no ensaio de COMP, para determinar a resistência à ruptura nos sentidos perpendicular (COMP \perp) e paralelo (COMP//) além dos respectivos módulos de elasticidade à compressão (MOECOMP//, MOECOMP \perp). O Quadro 2 sumariza as propriedades mecânicas ensaiadas nos painéis.

QUADRO 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS ANALISADAS NOS PAINÉIS OSB.

PROPRIEDADES	SIGLA	UNIDADE	N.º CP
Módulo de elasticidade perpendicular	MOE \perp	MPa	2
Módulo de ruptura perpendicular	MOR \perp	MPa	2
Força máxima de ruptura perpendicular	FM \perp	N	2
Módulo de elasticidade paralela	MOE//	MPa	2
Módulo de ruptura paralelo	MOR//	MPa	2
Força máxima de ruptura paralelo	FM//	N	2
Módulo de elasticidade à compressão perpendicular	MOECOMP \perp	MPa	2
Tensão de ruptura à compressão perpendicular	COMP \perp	MPa	2
Módulo de elasticidade à compressão paralela	MOECOMP//	MPa	2
Tensão de ruptura à compressão paralela	COMP//	MPa	2
Módulo de elasticidade dinâmico perpendicular	MOED \perp	MPa	1
Módulo de elasticidade dinâmico paralelo	MOED//	MPa	1
Ligação interna	LI	kPa	4

Foi determinado também o módulo de elasticidade dinâmico para cada um dos painéis, antes (MOED) e um dia após (MOED₁) o tratamento. Em seguida os painéis foram climatizados até massa constante e determinou-se novamente o módulo de elasticidade dinâmico após tratamento e climatização (MOED₃). O equipamento empregado foi o Stress Wave Timer Metriguard 239A. Este equipamento mede o tempo de passagem de uma onda entre a fonte geradora e a receptora da onda (Figura 28). De posse desse tempo, da massa específica do painel e da distância percorrida pela onda calculou-se o MOEd com base na equação 17:

$$MOED = \frac{v^2 \times Me}{g} \quad (17)$$

Onde:

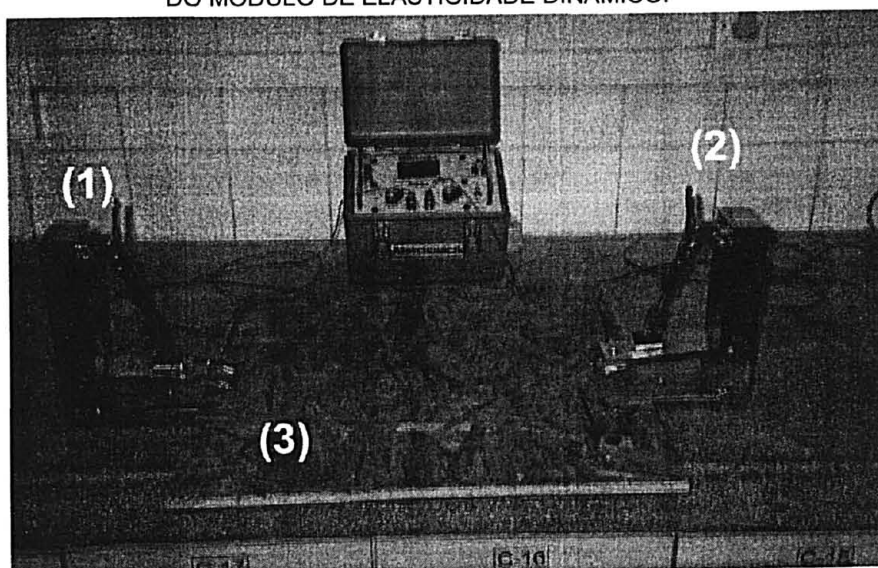
MOED = módulo de elasticidade dinâmico, kgf/cm², convertido em seguida para MPa;

v = velocidade (distância/tempo), cm/s;

Me = massa específica do painel, kg/cm³;

g = aceleração da gravidade, 980,4 cm/s²;

FIGURA 28 - EQUIPAMENTO STRESS WAVE TIMER PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.



NOTA: (1) Fonte geradora da onda; (2) Fonte receptora da onda; (3) painel.

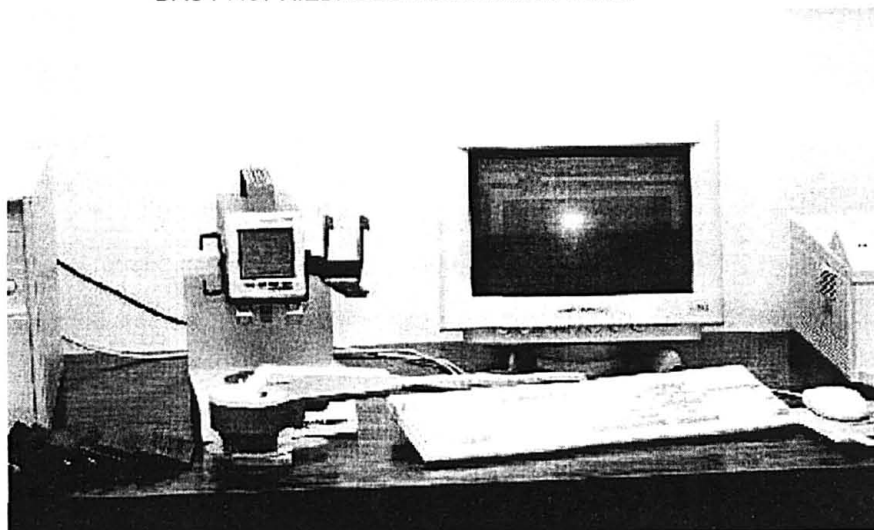
3.4.4 Propriedades Colorimétricas

Para cada painel foi retirado um CP (COR, Figura 27) de 5 x 5 cm, cuja cor foi medida em quatro pontos distintos da superfície. A análise colorimétrica foi conduzida empregando-se o espectrofotômetro Datacolor International Microflash - Model 200 (Figura 29). O equipamento trabalha com o sistema colorimétrico CIE L^*a^*b , que determina os parâmetros colorimétricos L^* (claridade), a^* (coordenada do eixo vermelho-verde) e b^* (coordenada do eixo azul-amarelo). De posse destes dados foi possível calcular os demais parâmetros colorimétricos, C (saturação) e h (ângulo da tinta), empregando-se as equações 18 e 19. O Quadro 3 sumariza as propriedades colorimétricas determinadas nos painéis.

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (18)$$

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (19)$$

FIGURA 29 - ESPECTROFOTÔMETRO MICROFLASH PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS.



Para os parâmetros L^* , a^* e b^* foi determinado também a diferença (ΔL^* , Δa^* e Δb^*) existente entre os painéis não-tratados (testemunha) e os tratados utilizando-se as equações 20, 21 e 22. Estes valores foram empregados para determinar as mudanças na cor, ΔE^* (equação 23) e na saturação, ΔC^* (equação 24) conforme CHARRIER et al. (2002).

$$\Delta L^* = L_f^* - L_i^* \quad (20)$$

$$\Delta a^* = a_f^* - a_i^* \quad (21)$$

$$\Delta b^* = b_f^* - b_i^* \quad (22)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (23)$$

$$\Delta C^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (24)$$

Onde:

ΔL^* = alteração na claridade dos painéis em função do tratamento térmico;

Δa^* = alteração na cor dos painéis no eixo vermelho-verde em função do tratamento térmico;

Δb^* = alteração na cor dos painéis no eixo amarelo-azul função do tratamento térmico;

ΔE^* = alteração na cor dos painéis em função do tratamento térmico;

ΔC^* = alteração da saturação da cor dos painéis em função do tratamento térmico;

L_i^* , a_i^* , b_i^* = parâmetros colorimétricos antes do tratamento térmico;

L_f^* , a_f^* , b_f^* = parâmetros colorimétricos após tratamento térmico;

QUADRO 3 - PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS DETERMINADAS NOS PAINÉIS OSB.

PROPRIEDADES	SIGLA	N.º CP
Claridade	L	1
Ângulo da tinta	h	1
Parâmetro a	a^*	1
Parâmetro b	b^*	1
Saturação da cor	C	1
Alteração da cor	ΔE^*	1
Alteração da saturação da cor	ΔC^*	1

Valores baixos de ΔE^* e ΔC^* correspondem a poucas mudanças na cor e na saturação e sugerem pequeno ou nenhum efeito do tratamento sobre estas propriedades colorimétricas.

3.4.5 Propriedades Químicas

De cada painel foi obtida uma amostra de 5 x 5 cm para análise química (AQ) via HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*), totalizando seis por tratamento. As amostras foram picadas manualmente, obtendo-se pequenas lascas que foram então misturadas e moídas em moinho laboratorial. Em seguida foi peneirado, e 3g do material retido na peneira de 60 mesh foi destinado à análise química.

O equipamento utilizado era composto por uma bomba de injeção SD-200 (Dynamax), um analisador AI-3 (Dynamax), acoplado a um detector Varian 9040. Empregou-se a coluna de análise de carboidratos Aminex HPX-87P. Os açúcares determinados em porcentagem (%) foram a glicose, xilose, galactose, arabinose e manose, sendo o primeiro açúcar primário da celulose e os restantes açúcares das hemiceluloses. Determinou-se também em porcentagem (%) a lignina Klason e a lignina solúvel. Esta última foi determinada através do espectrofotômetro Femto 700 Plus. O Quadro 4 apresenta as propriedades químicas determinadas nesse estudo.

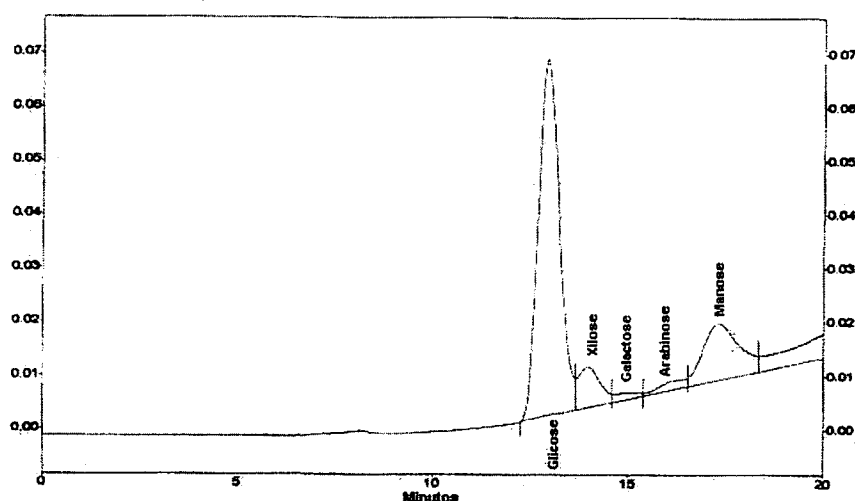
QUADRO 4 - PROPRIEDADES QUÍMICAS DETERMINADAS NOS PAINÉIS OSB.

PROPRIEDADES	UNIDADE	N.º CP
Glicose	%	1
Xilose	%	1
Galactose	%	1
Arabinose	%	1
Manose	%	1
Hemicelulose Total	%	1
Lignina	%	1
Lignina solúvel	%	1

Neste tipo de análise, o material hidrolisado e livre de extrativos é injetado por meio da bomba na coluna de análise. Os diferentes açúcares apresentam índices de refração específicos bem como tempos de passagem pela coluna distintos. A Figura 30 ilustra o Gráfico típico obtido nesta análise. Observa-se que cada açúcar analisado tem um pico de refração em tempos distintos. Traça-se uma

linha base para cada um destes açúcares e calcula-se a área sob a curva por integração. Obtida a área, este valor é utilizado para calcular a concentração em (mg/ml) do açúcar. Este cálculo é feito por meio de uma equação de regressão calibrada e específica do equipamento, cujo R^2 é muito próximo de 1, ou seja, a área sob a curva é altamente correlacionada com a concentração do açúcar na amostra.

FIGURA 30 - ÍNDICE DE REFRAÇÃO E TEMPO DE PASSAGEM DOS AÇÚCARES PELA COLUNA DE ANÁLISE.



3.5 ANÁLISE DO EXPERIMENTO

A análise estatística foi desenvolvida para se avaliar três aspectos principais de acordo com os objetivos específicos: comparar as propriedades entre painéis tratados e os painéis não-tratados (testemunha); estudar o efeito do tempo, da temperatura e da interação sobre as propriedades dos painéis tratados; e comparar as propriedades de estabilidade dimensional com as de um painel de compensado.

3.5.1 Comparação com as Propriedades dos Painéis Não-Tratados

Inicialmente foi feita uma comparação das propriedades dos painéis tratados com as propriedades do painel não-tratado (testemunha). O objetivo foi de avaliar se o tratamento térmico implicou em alguma alteração significativa nestas propriedades em comparação com as dos painéis não- tratados. Nesta avaliação foi empregada a análise de variância simples e na ocorrência de significância foi feito teste de Tukey a 5% de probabilidade para separação das médias das propriedades analisadas.

Cada combinação de temperatura e tempo de tratamento térmico foi considerada um tratamento estatístico, o que significa que foram avaliados sete tratamentos: uma testemunha e seis tratamentos térmicos. Para cada tratamento foram avaliados seis painéis (repetições), que foram considerados a unidade amostral utilizada no presente trabalho. A Tabela 21 apresenta o delineamento desse experimento. Adicionalmente procurou-se verificar se as propriedades mecânicas e físicas dos painéis de todos os tratamento atendiam aos requerimentos mínimos da norma da Structural Board Association para painéis OSB, cujos valores são apresentados na Tabela 22.

TABELA 21 - DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO PARA COMPARAÇÃO COM OS PAINÉIS NÃO-TRATADOS (TESTEMUNHA).

TRATAMENTO	PROPRIEDADES	N.º REPETIÇÕES
TESTEMUNHA		6
T1 (190°C, 12 min)	Mecânicas	6
T2 (190°C, 16 min)	Físicas	6
T3 (190°C, 20 min)	Químicas	6
T4 (220°C, 12 min)	Colorimétricas	6
T5 (220°C, 16 min)		6
T6 (220°C, 20 min)		6

TABELA 22 - PERFORMANCE FÍSICA E MECÂNICA MÍNIMA EXIGIDA DE PAINÉIS OSB SEGUNDO A NORMA CSA 0437.0

PROPRIEDADE	CLASSE ⁽¹⁾		
	O-2	O-1	R-1
MOR// (MPa)	29,0	23,4	17,2
MOR⊥ (MPa)	12,4	9,6	17,2
MOE// (MPa)	5.500	4.500	3.100
MOE⊥ (MPa)	1.500	1.300	3.100
LI (kPa)	345	345	345
IE24H (%) ⁽²⁾	15	15	15

FONTE: CLOUTIER (1998).

(1) O, partículas orientadas; R, partículas não-orientadas.

(2) Para painéis de espessura < 12,7 mm.

3.5.2 Efeito da Temperatura e do Tempo de Tratamento

Para aquelas propriedades cujo efeito do tratamento térmico foi significativo conforme definido no item 3.5.1, foi feita uma análise fatorial adicional com o objetivo de identificar se a causa da separação de médias foi em função do efeito da temperatura ou do tempo. Assim, o delineamento do experimento foi feito com o objetivo de se avaliar o efeito dos dois níveis de temperatura e três dos níveis de tempo sobre as propriedades dos painéis tratados. Deste modo, foram estudados os seis tratamentos térmicos (fatorial 2 x 3), com seis repetições, totalizando 36 painéis. A Tabela 23 apresenta o delineamento estatístico empregado nesta avaliação.

TABELA 23 - DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE TRATAMENTO TÉRMICO.

TEMPERATURA (°C)	TEMPO (min)	N.º REPETIÇÕES
190	12	6
	16	6
	20	6
220	12	6
	16	6
	20	6

A análise de variância fatorial foi feita empregando-se o pacote estatístico SPSS 11.5. Para as propriedades cujo efeito do tempo foi significativo foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para separação das médias.

3.5.3 Determinação dos Parâmetros Cinéticos da Degradação Térmica

Para as propriedades cujo efeito do tempo foi significativo, conforme item 3.5.2, foi determinado também a taxa constante de degradação térmica (k) para uma reação de 1ª ordem. Este tipo de reação ocorre numa taxa proporcional à quantidade do reagente que permanece (STAMM, 1964) e pode ser determinada pela equação 25, enquanto que a energia de ativação, que é a energia necessária para iniciar esta reação foi determinada pela equação 26 (STAMM, 1964). Pela equação 25 observa-se que o logaritmo do valor da propriedade residual é proporcional ao tempo do tratamento térmico (MITCHELL, 1988).

$$k = \frac{-\ln\left[\frac{a-x}{a}\right]}{t} \quad (25)$$

$$\Delta H = -2,3R * \left[\frac{\ln K}{\frac{1}{T}} \right] \quad (26)$$

Onde:

k = taxa constante de degradação térmica;

a = valor da propriedade da testemunha;

x = redução do valor da propriedade dos painéis tratados;

t = tempo do tratamento, minutos;

ΔH = energia de ativação, cal/moles;

R = constante dos gases, moles;

T = temperatura absoluta do tratamento, K;

3.5.4 Comparação com Painéis Compensados

As propriedades dos painéis tratados, relacionadas à estabilidade dimensional (IE2H, ABS2H, IE24H, ABS24H, TUE), foram comparadas com as propriedades de um painel compensado. Para tanto, foram adquiridos no comércio de Brasília (DF) painéis compensados fabricados pela Lofer Compensados, da classe WRP (resistente à água), colados com resina fenólica na gramatura de 380 g/m².

O painel compensado era composto de nove lâminas. As duas lâminas da capa (1, 2, 8 e 9) eram de guapuruvu (*Schizolobium amazonicum*) enquanto que as do miolo (3 a 7) eram de sumaúma (*Ceiba pentandra*), conforme identificação macroscópica feita no Setor de Anatomia da Madeira, do Laboratório de Produtos Florestais do IBAMA.

3.6 ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DO TRATAMENTO

3.6.1 Análise de Viabilidade Operacional

A análise consistiu no estudo teórico acerca das alternativas para a aplicação do tratamento térmico em ambiente industrial. Foram analisadas questões relativas ao lay-out de fábrica, equipamentos, táticas de aplicação, entre outros. Para tanto, foram feitos levantamentos junto a fabricantes de prensas, caldeiras, mesas, transportadoras e demais equipamentos demandados para aplicação do tratamento térmico.

Procurou-se levar em consideração alguns fatores na escolha do equipamento a ser utilizado, tais como: atendimento às características técnicas requeridas, disponibilidade de fornecimento por empresas nacionais ou estrangeiras mas com escritório no país, melhor custo-benefício e garantia de assistência técnica.

3.6.2 Análise de Viabilidade Econômica

O custo do tratamento térmico (C_{trat}) foi calculado levando em consideração os custos relativos ao investimento inicial, energia, depreciação, manutenção e seguro dos equipamentos, perdas, mão-de-obra e administração. A seguir são detalhados os cálculos dos diversos custos envolvidos no tratamento.

3.6.2.1 Depreciação

O custo de depreciação foi calculado sobre os custos do investimento inicial e da vida útil dos equipamentos (equação 27). O investimento inicial foi admitido como sendo a soma dos custos dos equipamentos necessários para o tratamento, levantados na análise operacional. A vida útil dos equipamentos foi admitida como sendo de 10 anos.

$$C_{dep} = \frac{Inv}{Vu * V_{pt}} \quad (27)$$

Onde:

C_{dep} = custo de depreciação, R\$/m³;

Inv = investimento inicial, R\$;

Vu = tempo de vida útil dos equipamentos, anos;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

Foi feito também o cálculo do número de prensas necessárias para prover o tratamento térmico de acordo com o volume de painéis a serem tratados (equação 28). Estimou-se que para cada prensa sejam necessários dois equipamentos para movimentação dos painéis (um carregador e um descarregador) além de uma mesa transportadora.

$$N_{prensa} = \frac{\frac{V_{pt} \times N_{painel}}{Dt}}{\left(\frac{60 \times Ht}{T_{trat} + I_{trat}} \right) \times Ap} \quad (28)$$

Onde:

$N_{prensas}$ = prensas necessárias para efetuar o tratamento, n.º;

N_{painel} = número de painéis, n.º/m³;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

Dt = dias de trabalho, dias/ano;

Ht = horas de trabalho, horas/dia;

T_{trat} = tempo do tratamento térmico, minutos;

I_{trat} = intervalo entre os tratamentos, minutos;

Ap = aberturas da prensa, n.º.

3.6.2.2 Remuneração do capital

A remuneração de capital foi função da remuneração do investimento e do volume de painéis em tratamento térmico. O cálculo foi feito segundo as equações 29, 30 e 31:

$$R_{inv} = \frac{Inv \times i}{V_{pt}} \quad (29)$$

$$R_{vpt} = \frac{V_{pet} \times Pp \times i}{V_{pt}} \quad (30)$$

$$C_{rem} = R_{inv} + R_{vpt} \quad (31)$$

Onde:

C_{rem} = custo de remuneração do capital, R\$/m³;

R_{inv} = remuneração do investimento, R\$/m³;

R_{vpt} = remuneração dos painéis tratados, R\$/m³;

Inv = investimento inicial, R\$;

i = taxa de desconto anual, %;

Pp = preço do painel, R\$/m³;

V_{pet} = volume de painel em tratamento, m³;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

3.6.2.3 Manutenção

O custo de manutenção foi o custo necessário para a manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos listados. Fixado em 2% do investimento inicial, foi calculado de acordo com a equação 32:

$$C_{mat} = \frac{Inv \times i_m}{V_{pt}} \quad (32)$$

Onde:

C_{mat} = custo de manutenção, R\$/m³;

Inv = investimento inicial, R\$;

i_m = taxa de manutenção dos equipamentos, %;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

3.6.2.4 Mão de obra

Os custos com mão de obra foram determinados em função do número de funcionários envolvidos diretamente com o tratamento térmico dos painéis e dos respectivos salários. Os encargos sociais foram admitidos como equivalentes a 100% do salário do funcionário. O custo de mão de obra foi calculado por meio da equação 33:

$$C_{mo} = \frac{St \times 12}{V_{pt}} \quad (33)$$

Onde:

C_{mo} = custo de mão de obra, R\$/m³;

St = salários totais incluindo encargos sociais, R\$;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

3.6.2.5 Energia

Os custos de energia foram divididos em duas categorias: energia elétrica e energia térmica. No cálculo do custo de energia térmica é necessário se conhecer o consumo de vapor por hora e as características do resíduo (massa e volume). O resíduo utilizado é de pinus muito comum no local de implantação. Esse material apresenta uma massa específica de 250 kg/m³ e poder calorífico de 3.000 kcal/kg. O custo de energia térmica foi assim determinado:

$$Q_{et} = N_{painel} \times H \times 1,45 \quad (34)$$

$$Q_{ee} = [(P_{prensa} \times N_{prensa}) + (P_{car} \times N_{car})] \times 0,736 \times Dt \times Ht \quad (35)$$

$$C_{et} = \frac{\left[\frac{\left(\frac{Q_{et}}{P_{c_{res}}} \right)}{M_{res}} * P_{res} \right]}{V_{pt}} \quad (36)$$

$$C_{ee} = \frac{Q_{ee} \times P_{ee}}{V_{pt}} \quad (37)$$

$$C_{energ} = C_{et} + C_{ee} \quad (38)$$

Onde:

Q_{et} = quantidade de energia térmica para o tratamento, kcal/ano;
 N_{painel} = número de painéis tratados, n.º/ano;
 H = quantidade de energia para aquecer o painel, Kcal;
 Q_{ee} = quantidade de energia elétrica para o tratamento, KWh/ano;
 P_{prensa} = potência instalada da prensa, CV;
 N_{prensa} = número de prensas, n.º;
 P_{car} = potência instalada do carregador, CV;
 N_{car} = carregadores necessários, n.º;
 Dt = dias de trabalho, dias/ano;
 Ht = horas de trabalho, horas/dia;
 C_{et} = custo de energia térmica, R\$/m³;
 $P_{c_{res}}$ = poder calorífico do resíduo, kcal/kg;
 M_{res} = massa específica do resíduo, kg/m³;
 P_{res} = custo do resíduo, R\$/m³;
 V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;
 C_{ee} = custo de energia elétrica, R\$/m³;
 P_{ee} = preço da energia elétrica, R\$/KWh;
 C_{energ} = custo total de energia, R\$/m³;

3.6.2.6 Perdas

A perda pode ocorrer em função da quebra/lasca durante o manuseio dos painéis tratados. No presente trabalho admitiu-se perda da ordem de 0,5%. O custo advindo da perda foi determinado conforme equação 43:

$$C_{perdas} = \frac{\left(\frac{Inv \times i_p}{100} \right) \times Pp}{V_{pt}} \quad (39)$$

Onde:

C_{perdas} = custo de perdas, R\$/m³;

Inv = investimento inicial, R\$;

i_p = taxa de perdas, %;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

P_p = preço do painel, R\$/m³;

3.6.2.7 Seguro

O custo de seguro foi admitido como sendo equivalente a 0,5% do investimento inicial e foi calculado conforme a seguinte equação 40:

$$C_{seg} = \frac{\left(\frac{Inv \times i_s}{100} \right)}{V_{pt}} \quad (40)$$

Onde:

C_{seg} = custo de seguro, R\$/m³;

i_s = taxa de seguro, %;

Inv = investimento inicial, R\$;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

3.6.2.8 Administração

O custo de administração envolve as despesas de pessoal, de taxas, comunicação, viagens, material de escritório, etc. Deste modo é o custo dos fatores indiretos da produção.

$$C_{adm} = \frac{C_{am} \times 12}{V_{pt}} \quad (41)$$

Onde:

C_{adm} = custo de administração, R\$/m³;

C_{am} = custo de administração mensal, R\$;

V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;

3.6.2.9 Custo Total do Tratamento

O custo total do tratamento (R\$/m³) foi a soma de todos os custos calculados anteriormente (equação 42):

$$C_{trat} = C_{dep} + C_{rem} + C_{mat} + C_{mo} + C_{energ} + C_{perdas} + C_{seg} + C_{adm} \quad (42)$$

Onde:

C_{trat} = custo total do tratamento, R\$/m³;
 C_{dep} = custo de depreciação, R\$/m³;
 C_{rem} = custo de remuneração de capital, R\$/m³;
 C_{mat} = custo de manutenção, R\$/m³;
 C_{mo} = custo de mão de obra, R\$/m³;
 C_{energ} = custo de energia, R\$/m³;
 C_{perdas} = custo de perdas, R\$/m³;
 C_{seg} = custo de seguro, R\$/m³;
 C_{adm} = custo de administração, R\$/m³;

A análise econômica foi desenvolvida com objetivo de determinar algumas variáveis determinísticas relacionadas à questão financeira da adoção do tratamento térmico dos painéis. O fluxo de caixa para receitas foi considerado contínuo durante o período do investimento e foi calculado por meio da equação 43. Neste cálculo foram descontados o custo do tratamento (C_{trat}) e o custo de produção (C_{prod}).

$$FC = Pp \times V_{pt} \times \left(1 - \frac{C_{prod} + I_{trat}}{100} \right) \quad (43)$$

Onde:

FC = fluxo de caixa, R\$/ano;
 Pp = preço do painel, R\$/m³;
 I_{trat} = Impacto do custo do tratamento térmico em relação ao preço do painel, %;
 V_{pt} = volume de painel tratado, m³/ano;
 C_{prod} = custo de produção, % (definido a frente).

Com base nas variáveis listadas na Tabela 24 foram calculadas as variáveis Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Líquido Presente (VPL), Índice Benefício Custo (IBC) de acordo com as equações 44, 45 e 46.

TABELA 24 - VARIÁVEIS EMPREGADAS NA ANÁLISE FINANCEIRA.

VARIÁVEL	VALOR
Volume de painel tratado (Vpt)	100.000 m ³ /ano
Dias trabalhados (Dt)	340 dias/ano
Horas trabalhadas (Ht)	16h/dia
Taxa de desconto anual (i)	10%
Custo de produção (C _{prod})	90%
Preço da energia elétrica (P _{ee})	R\$ 152,00/MW
Preço do resíduo (P _{res})	R\$ 45,00/ton
Preço do painel (Pp)	R\$ 420,50/m ³
Vida útil do empreendimento (j)	20 anos

$$VPL = \frac{\sum_{j=0}^n [FC_j]}{(1 + TIR)^j} = ZERO \quad (44)$$

$$VPL = \frac{\sum_{j=0}^n [FC_j]}{(1 + i)^j} \quad (45)$$

$$IBC = \frac{\sum_{j=1}^n [FC_j] / (1 + i)^j}{Inv} \quad (46)$$

Onde:

TIR = taxa interna de retorno, %;

VPL = valor presente líquido, R\$;

IBC = índice benefício custo;

Inv = investimento inicial, R\$;

FC = fluxo de caixa, R\$/ano;

i = taxa de desconto anual, %;

j = vida útil do investimento, anos;

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS

A Tabela 25 apresenta as características dos painéis. Observa-se que o lote era bastante homogêneo com massa específica em torno de $0,64 \text{ g/cm}^3$, ou seja, equivalente à massa específica nominal do painel. O teor de umidade no momento do tratamento também pode ser considerado bastante homogêneo, com valor médio em torno de 9%. A homogeneidade destas características pôde ser comprovada através da análise estatística, que não apontou diferença estatisticamente significativa entre as médias (Anexo 2, Tabela 5).

TABELA 25 - CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS OSB ANTES DO TRATAMENTO.

TRATAMENTO	ME (g/cm^3)		TU (%)	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)
TESTEMUNHA	0,633	4,76	9,27	3,98
T1 (190°C, 12')	0,649	4,00	9,22	4,22
T2 (190°C, 16')	0,645	5,81	8,93	3,30
T3 (190°C, 20')	0,638	6,89	8,96	3,66
T4 (220°C, 12')	0,637	5,34	9,29	3,96
T5 (220°C, 16')	0,650	6,03	9,35	4,95
T6 (220°C, 20')	0,641	6,76	9,08	2,51
Média	0,643	5,80	9,13	3,76

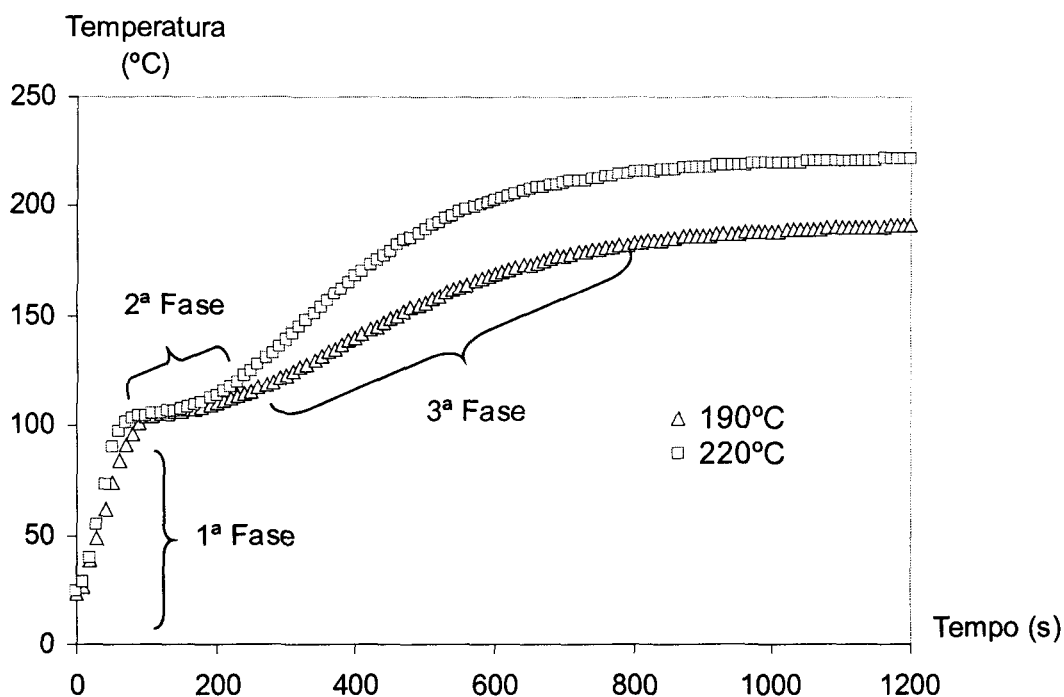
4.2 EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS

O Gráfico 2 mostra a evolução da temperatura no interior dos painéis durante o tratamento térmico. Os valores que compõem este Gráfico são uma média de todas as temperaturas observadas no tratamento dos 36 painéis. Assim, para ambas as temperaturas testadas há 18 repetições, seis para cada tempo analisado.

Observa-se claramente que no tratamento a 220°C há uma evolução mais rápida da temperatura no interior do painel em comparação ao tratamento a 190°C.

Tal constatação certamente já era esperada. Por outro lado, observa-se que as curvas de aquecimento são compostas por três fases, distinguíveis pela sua inclinação.

GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DURANTE O TRATAMENTO TÉRMICO.



Os Gráficos 3 e 4 mostram a 1ª e 3ª fase do aquecimento do painel às temperaturas de 190°C e 220°C, respectivamente. A 1ª fase vai do início do tratamento até aproximadamente 100°C e observa-se evolução muito rápida da temperatura interna do painel. À temperatura de 190°C são necessários apenas 90 s para alcançar 100°C no interior do painel, enquanto que a 220°C somente 70 s. A taxa de aquecimento apontou para valores de 0,955°C/s à 190°C e de 1,258°C/s à 220°C. Esta rápida evolução da temperatura está em função do conteúdo de umidade do painel, uma vez que as moléculas de água contribuem na transferência de calor.

Quando o painel atinge 100°C, ocorre uma grande redução na evolução da sua temperatura interna, o que pode ser observado pela redução na inclinação da reta. Inicia-se a 2ª fase, onde a temperatura do painel passa a aumentar muito lentamente, mantendo-se quase constante. Esta fase vai até 200 s a 190°C, e 150 s a 220°C, e coincide com o momento em que se nota a liberação de gases, principalmente vapor d'água, ou seja, o painel perde água.

GRÁFICO 3 - 1ª E 3ª FASES DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS TRATADOS A 190°C.

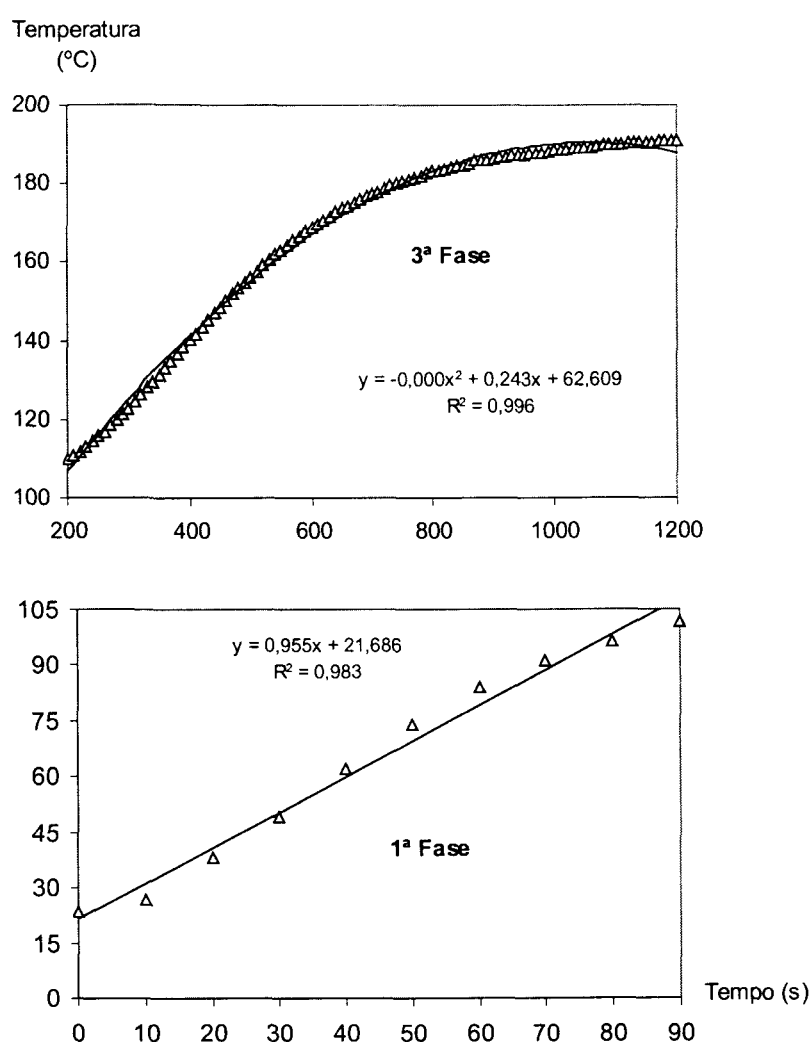
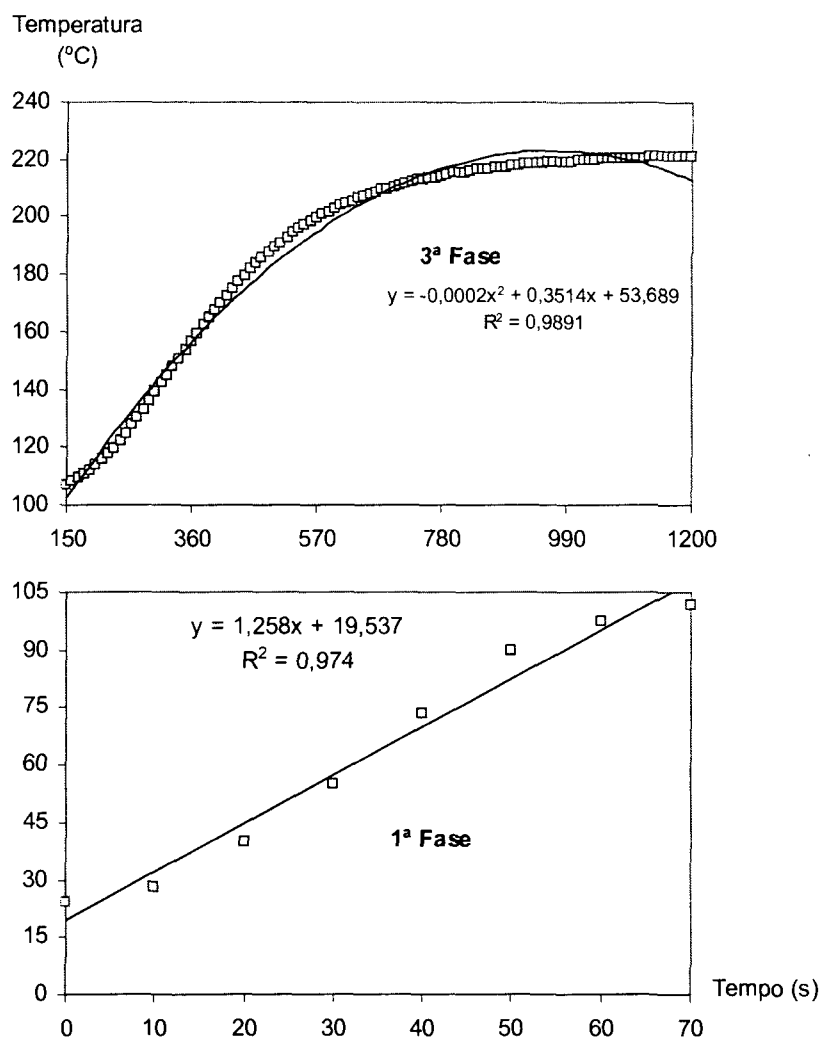


GRÁFICO 4 - 1ª E 3ª FASE DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS TRATADOS A 220°C.



Após a retirada da água do painel, a sua temperatura interna volta a se elevar, embora mais lentamente que na 1ª fase. Tem-se aí o início da 3ª fase, cuja duração vai até o painel atingir temperatura próxima do tratamento. Nesta fase, a inclinação da reta é reduzida (Gráfico 2), ocorre a liberação de gases.

4.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO

4.3.1 Efeito nas Propriedades Físicas

A Tabela 26 apresenta a média e o coeficiente de variação para as propriedades estabilidade dimensional dos painéis tratados e da testemunha. Observa-se que para todas as propriedades, o comportamento dos painéis tratados foi superior ao do painel testemunha, indicando que o tratamento térmico proposto alterou as relações entre a água e madeira.

TABELA 26 - PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL E PERDA DE MASSA DOS PAINÉIS OSB.

TRATAMENTO	PROPRIEDADES							
	IE2H	IE24H	ABS2H	ABS24H	TUE	TNRE	PMAT	PDMAT
	------(%)-----							
TESTEMUNHA	8,91 (11,6)	19,17 (22,5)	18,64 (9,3)	48,76 (13,2)	9,27 (1,0)	8,23 (26,2)	-	-
T1 (190°C, 12')	6,53 (9,7)	14,60 (21,6)	15,07 (7,4)	40,10 (12,1)	7,73 (4,2)	4,77 (13,5)	9,25 (5,1)	1,38 (12,8)
T2 (190°C, 16')	6,90 (14,6)	17,90 (20,6)	14,98 (5,6)	46,51 (10,7)	7,17 (3,3)	5,71 (24,8)	9,47 (3,7)	1,64 (7,6)
T3 (190°C, 20')	6,51 (20,8)	18,10 (26,4)	14,40 (3,1)	47,34 (11,8)	6,93 (3,7)	4,81 (36,2)	10,10 (3,02)	1,90 (13,1)
T4 (220°C, 12')	5,06 (20,5)	15,04 (18,6)	12,72 (10,0)	39,71 (17,3)	6,73 (4,0)	2,11 (23,8)	10,40 (3,6)	2,39 (15,3)
T5 (220°C, 16')	4,00 (12,3)	10,77 (27,3)	10,71 (4,1)	35,82 (12,8)	5,93 (5,0)	0,88 (21,7)	10,70 (3,9)	3,24 (14,4)
T6 (220°C, 20')	3,56 (9,6)	9,70 (8,9)	9,43 (3,4)	32,25 (24,3)	5,01 (2,5)	0,45 (19,7)	11,90 (3,3)	3,87 (13,1)

NOTAS: Coeficiente de variação (%) entre parênteses.

Os resultados da Tabela 26 foram utilizados para o cálculo da eficiência do tratamento (E_f) em melhorar determinada propriedade, conforme ROWELL & YOUNGS (1981). Como E_f é a relação entre o valor da propriedade da testemunha e o valor do painel tratado, valores positivos indicam efeito benéfico do tratamento, enquanto valores negativos indicam efeito deletério. Os resultados de E_f são apresentados na Tabela 27.

Observa-se que todos os valores de Ef foram positivos indicando que o tratamento foi eficiente na melhoria da estabilidade dimensional dos painéis tratados. Há também propriedades em que tratamento térmico foi mais eficiente, como no caso do IE2H (Ef Média 39,1%), TNRE (39,1%) e ABS2H (30,9%), enquanto em outras foi menos eficiente, tal como ABS24H (17,4%).

TABELA 27 - EFICIÊNCIA (%) DO TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS PAINÉIS OSB.

TRATAMENTO	PROPRIEDADES					
	IE2H	IE24H	ABS2H	ABS24H	TUE	TNRE
T1 (190°C, 12')	26,7	23,9	19,2	17,8	16,6	42,0
T2 (190°C, 16')	22,6	6,6	19,7	4,6	22,6	30,6
T3 (190°C, 20')	26,9	5,6	22,8	2,9	24,9	41,6
T4 (220°C, 12')	43,2	21,5	31,8	18,6	27,4	74,4
T5 (220°C, 16')	55,1	43,8	42,5	26,5	36,0	89,4
T6 (220°C, 20')	60,0	49,4	49,4	33,9	45,9	94,5
MÉDIA	39,1	25,1	30,9	17,4	28,9	39,1

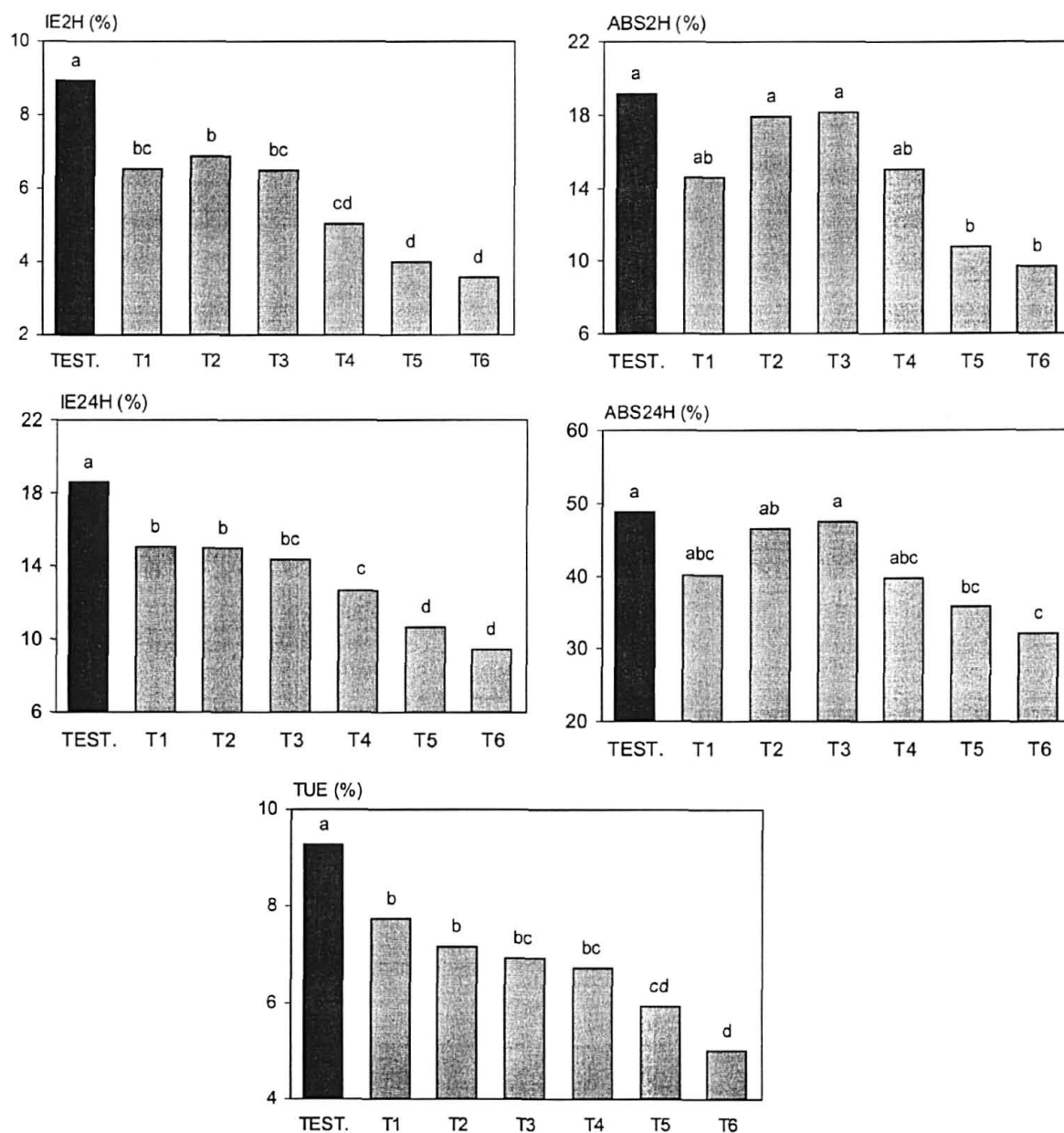
NOTA: Valores positivos denotam efeito benéfico.

No geral, o tratamento térmico significou uma melhoria destas propriedades, superior a 30%. Observa-se também que os valores de Ef são crescentes à medida que aumenta a temperatura e o tempo do tratamento, indicando a possibilidade de diferença significativa entre as propriedades dos painéis tratados em comparação com a testemunha.

A análise estatística (Anexo 2, Tabela 6), detectou a existência de diferenças significativas entre as propriedades de estabilidade dimensional avaliadas. Como pode ser observado no Gráfico 5, o teste de média, detectou que mesmo o tratamento menos severo, T1 (190°C, 12') reduziu significativamente IE2H, IE24H e TUE, em comparação com a testemunha. Para ABS2H e ABS24H, o tratamento térmico também foi efetivo, embora em menor magnitude. Assim, o tratamento proposto reduziu tanto a adsorção quanto a absorção de água pelo painel. Deste modo, a eficiência do tratamento térmico sobre as propriedades de

estabilidade, quantificado na Tabela 27, foi de tal magnitude que implicou em diferenças estatisticamente significativas.

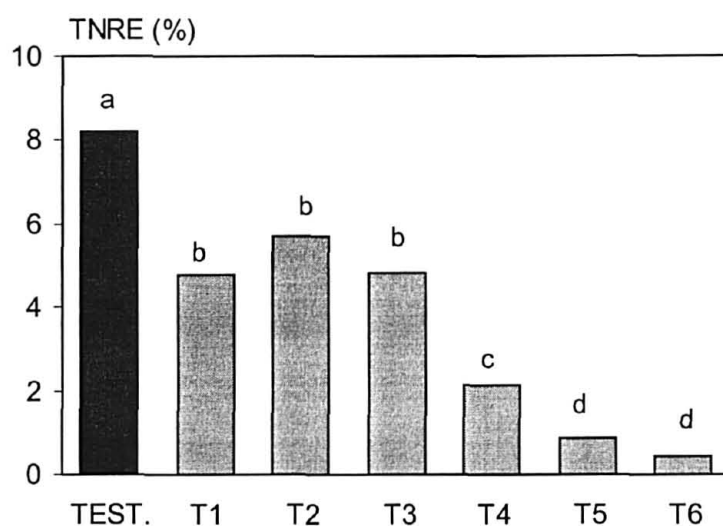
GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS PAINÉIS OSB.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

A redução do IE era o principal objetivo do tratamento, e pode-se afirmar que isto foi obtido. A hipótese é de que o tratamento térmico liberou as tensões internas de compressão geradas durante a prensagem do painel. Isto pode ser observado através dos valores obtidos para a taxa de não-retorno em espessura (TNRE) apresentados no Gráfico 6.

GRÁFICO 6 - VALORES DE TNRE APÓS O ENSAIO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS OSB.



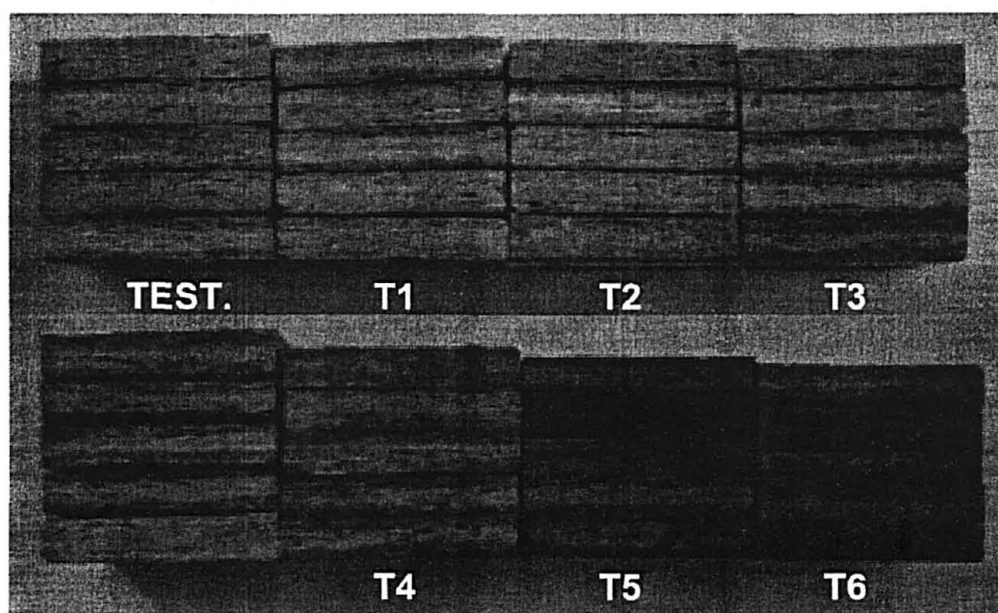
Quando o painel é submerso em água, ocorre a liberação das tensões de compressão, além do inchamento próprio da madeira, que então determinam a intensidade do IE. Se o painel é seco, a madeira tende a contrair em função da retirada da água, reduzindo assim sua espessura. No entanto, a secagem atua apenas sobre este aspecto, não tendo influência sobre a componente relativa às tensões internas de compressão.

A TNRE expressa o inchamento definitivo do painel que é justamente aquele oriundo da liberação das tensões internas de compressão. Como pode ser observado no Gráfico 6, quanto maior a temperatura do tratamento térmico, menor é o inchamento definitivo do painel, indicando que o tratamento térmico reduziu o nível das tensões de compressão, proporcionando melhoria no IE dos painéis. Por outro lado, o aumento do tempo teve efeito apenas na temperatura de 220°C. Os

resultados obtidos indicam que o tratamento térmico eliminou quase que totalmente as tensões dos painéis tratados, como verificado para T5 e T6.

A Figura 31 apresenta comparativamente o aspecto dos painéis tratados e da testemunha após o ensaio de IE24H e posterior secagem em estufa. Observa-se que de fato a espessura final dos painéis tratados foi inferior àquela da testemunha, e que esses valores são ainda menores com o aumento da temperatura e do tempo do tratamento térmico. Deste modo, o tratamento térmico, além de reduzir a intensidade do IE, faz com que o painel praticamente retorne à espessura original, quando a água é retirada, tornando-o mais resistente às variações ambientais.

FIGURA 31 - ASPECTO DOS PAINÉIS APÓS O ENSAIO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA E SECAGEM EM ESTUFA.

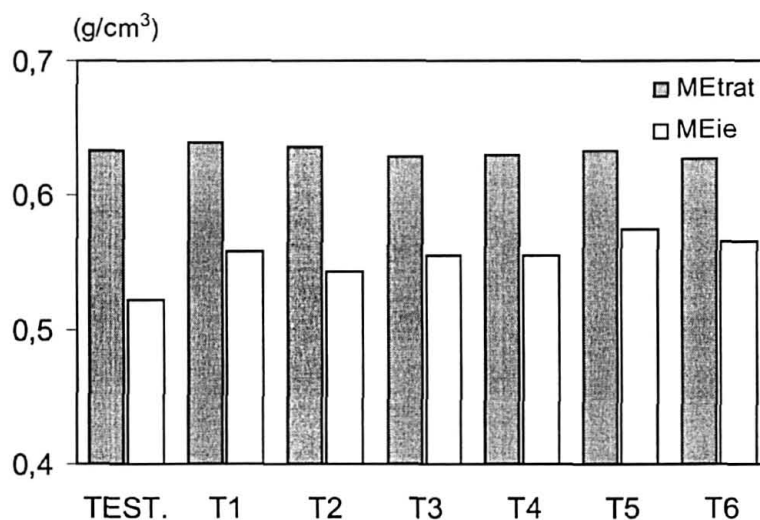


As tensões são liberadas em função da natureza dos polímeros que compõem a madeira. Como explicado anteriormente, estes polímeros são viscoelásticos, ou seja, apresentam características variando desde o estado de fluídos viscosos a sólidos linearmente elásticos (vítreo). Estas variações ocorrem basicamente em função da temperatura em que se encontra o polímero, e cuja temperatura divisora entre os estados é chamada de, temperatura de transição viscoelástica (T_g).

A T_g varia com a umidade, mas para a lignina à umidade de equilíbrio, é admitida como sendo na ordem de 170°C (HSU et al., 1989). Deste modo, quando a lignina está abaixo desta temperatura comporta-se como um sólido rígido (vítreo). No entanto, quando está à temperatura acima de 170°C comporta-se como um polímero viscoso, perdendo sua rigidez. Sob esta condição, que aqui foi proporcionada pelo tratamento térmico, é que se dá então a liberação das tensões de compressão.

Valores mais elevados de TNRE indicam que a espessura do painel após o ensaio de inchamento e posterior secagem, é aumentada, implicando em redução da sua massa específica. Isso ocorre porque a massa dos painéis não é afetada no ensaio de inchamento, mas o volume ocupado por essa massa de partículas aumenta, reduzindo assim sua massa específica. O Gráfico 7 apresenta os valores da massa específica após o tratamento (ME_{TRAT}) e após o ensaio de inchamento e secagem em estufa (ME_{IE}).

GRÁFICO 7 - VALORES DE MASSA ESPECÍFICA APÓS O ENSAIO DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS (ME_{IE})



Observa-se por este Gráfico que ME_{IE} do painel testemunha é ligeiramente inferior à dos painéis tratados. Os painéis testemunha também sofreram uma redução maior de massa específica, quando se compara com os valores iniciais. Do

ponto de vista prático, isso implica em uma possível redução das propriedades de resistência, comprometendo o comportamento estrutural do painel. Além disso, a liberação das tensões de compressão foi o principal para IE dos painéis testemunha, o que significa que as tensões desenvolvidas foram de tal magnitude que foram superiores às forças adesivas entre as partículas, e portanto, espera-se também que a qualidade da colagem tenha sido afetada também.

A propriedade TUE respondeu muito bem ao tratamento térmico, como pôde ser visto no Gráfico 5. Esta propriedade relaciona o montante de moléculas de água adsorvida nos sítios dos grupos hidroxila da parede celular, e deste modo, o que se conclui é que o tratamento térmico reduziu estes sítios em tal magnitude que implicou na redução pronunciada de TUE. Além disso, o tratamento térmico altera a estrutura dos polímeros da madeira, tornando-os menos higroscópicos ou mesmo transformando-os quimicamente.

A redução dos sítios para adsorção de água ocorre em função da reorganização estrutural dos polímeros frente ao tratamento térmico. KOLIN e JANEZIC (1996) argumentam que a capacidade da madeira em adsorver as moléculas de água está em função da organização da estrutura interna da celulose, e que o tratamento térmico provavelmente afeta a acessibilidade aos grupos hidroxila da zona amorfa, levando a uma perda parcial para formação de ligações com as moléculas de água, implicando em menor TUE.

TJEERDSMA et al. (1998) afirmam que a matriz formada pela celulose e lignina passa por um processo de entrelaçamento, ou seja, formam uma rede de ligações entre si, reduzindo assim os sítios de adsorção de água. Além disso, as microfibrilas da celulose são envolvidas por uma rede mais firme e inelástica, reduzindo a sua expansão quando na presença de moléculas de água. A formação desta matriz de lignina e celulose em função do tratamento térmico também foi evidenciada por KOSIKOVA et al. (1999) e abordada por FENGEL e WEGENER (1989).

SIVONEN et al. (2002) argumentam que o tratamento térmico implica em redução dos grupos metoxil, e que isso aumenta o grau de entrelaçamento dentro da matriz de lignina o que parece estar associado à melhoria da estabilidade dimensional e da redução da higroscopicidade da madeira tratada termicamente. TJEERDSMA et al. (2000) argumentam que também a redução das hemiceluloses, a esterificação e a redução do grau de cristalinidade da celulose também podem ser apontadas como fatores para redução da higroscopicidade da madeira tratada termicamente.

O grau de cristalinidade (GC) expressa a relação existente entre as regiões cristalina e amorfa da celulose. Os sítios dos grupos hidroxila estão disponíveis na região amorfa da celulose por onde a molécula entra livremente e adsorve, enquanto que na região cristalina a molécula é adsorvida apenas na superfície. Vários autores (PÉTRISSANS et al., 2003; ISHIGURI et al., 2001b; BHUIYAN et al., 2001; BHUIYAN et al., 2000; KOSIKOVA et al., 1999) têm demonstrado que o tratamento térmico reduz a região amorfa da celulose, ou seja aumenta GC, dificultando deste modo a adsorção de moléculas de água e consequentemente reduzindo o TUE dos painéis tratados. SIVONEN et al. (2002) afirmam que a liberação de ácido acético durante o tratamento térmico provoca de deterioração da estrutura das hemiceluloses e a celulose amorfa, que então aumenta do grau de cristalinidade da madeira tratada.

O aumento de GC também é apontado por PÉTRISSANS et al. (2003) como a alteração responsável pela redução da molhabilidade da madeira tratada termicamente. Os autores empregaram temperatura de 240°C por oito horas, em quatro espécies de madeira e os resultados apontaram para um aumento substancial do ângulo de contato formado entre o líquido e a superfície da madeira, evidenciando assim a redução da molhabilidade destas madeiras.

STAMM (1964) argumenta que o tratamento térmico ocasiona a formação de polímeros de furfural, a partir das hemiceluloses, que são então compostos menos hidrofílicos. As hemiceluloses são os polímeros mais hidrofílicos e também os mais sensíveis à degradação pelo tratamento térmico, como será visto à frente.

Verificaram-se também reduções significativas de ABS para os tratamentos de maior temperatura (T5 e T6). A explicação para este fato pode basear-se em duas hipóteses: o tratamento térmico alterou a porosidade dos painéis e por questões relativas ao TUE, discutidas anteriormente. A absorção de água, diferentemente de TUE, é um fenômeno muito mais físico que químico e está relacionado à porosidade (espaços vazios) dos painéis e da madeira propriamente dita. Quando o painel está submerso a água líquida ocupa os espaços vazios formados entre as partículas e o interior das células da madeira, onde permanece pela ação de forças capilares.

A redução dos espaços inter-partículas teria ocorrido se durante o tratamento térmico, além da temperatura, tivesse sido aplicada pressão, permitindo uma maior aproximação das partículas. No tratamento proposto, a pressão foi muito baixa, apenas com intensidade suficiente para prover o contato dos pratos da prensa com o painel. Assim, aparentemente este não seria uma razão adequada para a redução de ABS. Por outro lado, pode ter ocorrido alguma alteração na morfologia dos elementos anatômicos, como a redução das dimensões dos traqueídes.

CHEN e WORKMAN JR. (1980), estudando os efeitos da vaporização sobre a madeira de black walnut, verificaram que a área transversal do lume das células foi reduzida em até 30%. CUTTER et al. (1980) avaliaram o diâmetro e o lume de traqueídes de madeiras submetidas à pirólise. Os resultados à temperatura de 250°C (próxima à adotada neste trabalho) indicaram redução do diâmetro do lume dos traqueídes. Diante disso, supõe-se que a redução da absorção possa ter ocorrido em função de alterações nas dimensões dos traqueídes da madeira dos painéis tratados termicamente.

Quando o painel é submerso, além da água líquida que penetra e permanece ocupando os espaços vazios, há também moléculas de água adsorvidas nos sítios de hidroxila, e uma vez que estes sítios foram reduzidos, como explicado anteriormente, a absorção global de água dos painéis tratados tende a diminuir. Assim, a redução de ABS observada nos painéis tratados, supõe-se ter se dado sobre a influência de dois fatores: alteração anatômica dos traqueídes e redução do sítios para adsorção de água.

Entretanto, por outro lado, HIETALA et al. (2002), estudando a estrutura anatômica por meio da técnica de ressonância magnética nuclear (NMR), evidenciaram aumento da porosidade, ou seja, incremento do volume dos poros da parede celular dos traqueídes da madeira tratada termicamente entre 180°C e 230°C, além de uma melhoria na difusividade no sentido longitudinal. Os autores argumentam que isto ocorreu em função da degradação dos componentes constituintes da parede celular e possivelmente pela remoção de barreiras ao longo dos traqueídes.

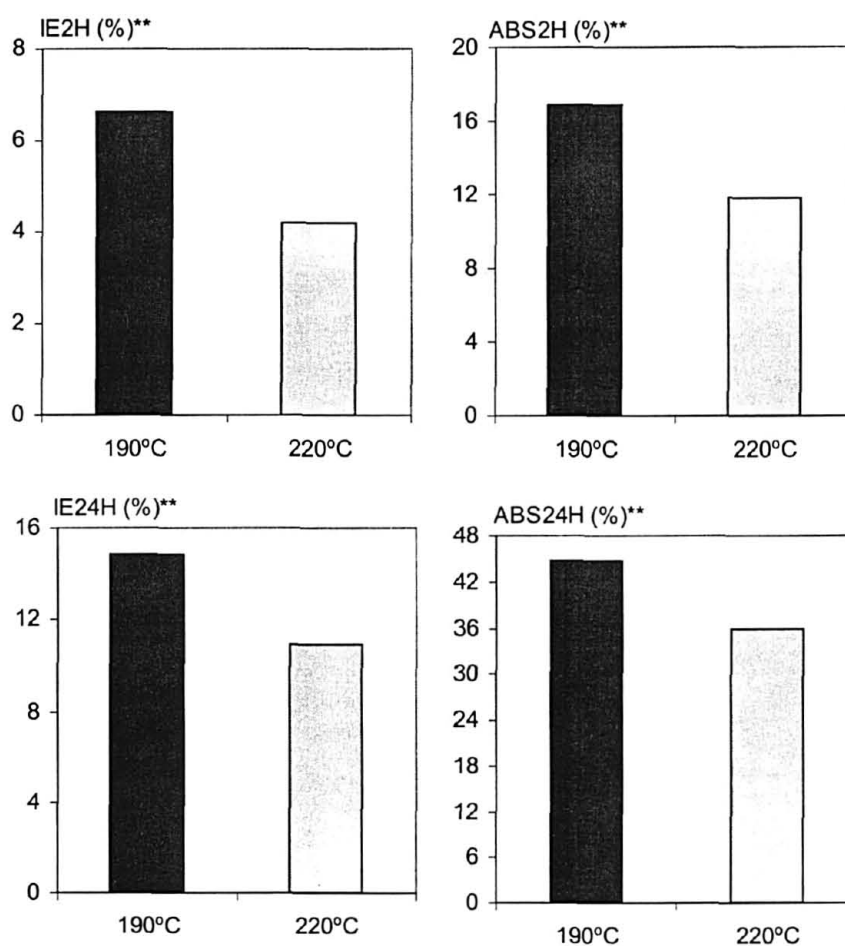
A Tabela 28 apresenta a média e o coeficiente de variação das propriedades físicas dos painéis tratados, afetadas pelo tratamento térmico, agrupadas pela temperatura. Pode-se observar que há uma tendência de redução do inchamento, da absorção e adsorção de água, e um acréscimo da perda de massa dos painéis.

O resultado da análise de variância fatorial do efeito da temperatura e do tempo sobre as propriedades físicas é apresentado no Anexo 3, Tabelas 12 e 13. Foi identificado efeito significativo da temperatura para todas as propriedades da Tabela 28, exceto ME_{TRAT} (Gráficos 8 e 9). Para IE2H, ABS2H, IE24H, ABS24H e TUE a temperatura reduz seus valores, ou seja, o aumento da temperatura de tratamento de 190°C para 220°C torna os painéis mais estáveis.

TABELA 28 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.

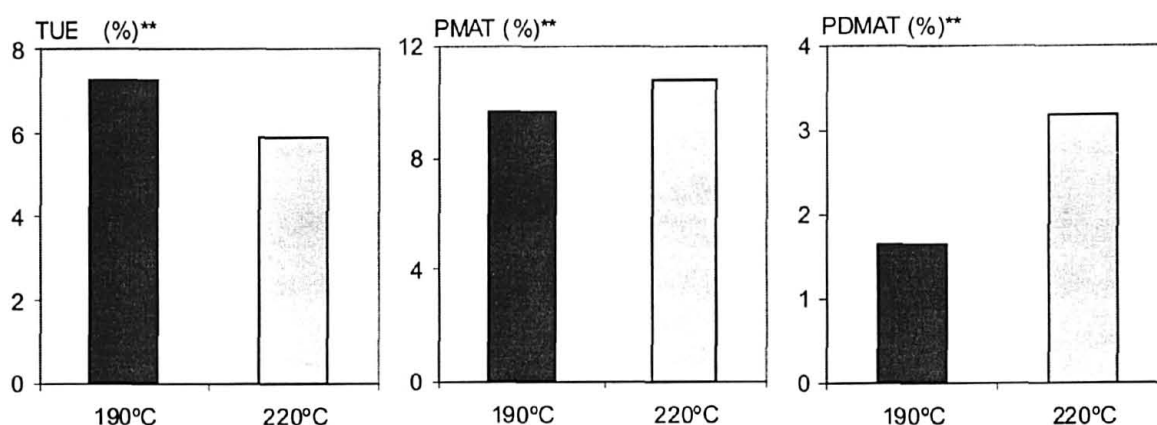
PROPRIEDADE	190°C		220°C	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)
IE2H (%)	6,64	14,91	4,20	17,71
ABS2H (%)	16,86	21,35	11,84	27,62
IE24H (%)	14,81	5,67	10,95	14,43
ABS24H (%)	44,65	13,15	35,92	19,27
TUE (%)	7,28	7,55	5,89	17,15
PMAT (%)	9,62	5,21	10,83	5,33
PDMAT (%)	1,64	17,20	3,17	23,66
ME _{TRAT} (g/cm ³)	0,634	3,17	0,623	4,65

GRÁFICO 8 - EFEITO DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO SOBRE IE E ABS, EM 2 E 24 HORAS.

NOTA: ** significativo pela ANOVA ao nível de $\alpha = 0,01$.

Sendo assim, as diferenças identificadas para estas propriedades entre os painéis tratados e a testemunha são relacionadas à temperatura do tratamento, e quanto maior a temperatura, mais estáveis tornam-se os painéis tratados. Para as variáveis relacionadas à perda de massa (PMAT e PDMAT) observa-se pela análise do Gráfico 9 que novamente quanto maior a temperatura de tratamento, maior é a perda de massa, enquanto que a massa específica dos painéis (ME_{TRAT}) não foi influenciada pelo tratamento.

GRÁFICO 9 - EFEITO DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO SOBRE TUE, PMAT E PDMAT.



NOTA: ** significativo pela ANOVA ao nível de $\alpha = 0,01$.

Comparando-se os valores, conclui-se que o tratamento a 220°C implica em melhoria mais acentuada das propriedades relacionadas à estabilidade dimensional (IE, ABS, TUE) em comparação ao tratamento à 190°C, ou seja, reduziu a absorção de água, o inchamento, bem como tornou o painel menos higroscópico (adsorção de água). As melhorias variaram de 19% (TUE) a 37% (IE2H).

Observa-se também que embora a perda de massa (PMAT e PDMAT) tenha sido baixa, o efeito da temperatura foi altamente significativa (Anexo 3, Tabela 13), isto não refletiu na redução da massa específica dos painéis, uma vez que ME_{TRAT} demonstrou não ter sido afetada pela temperatura. A massa específica do painel tem influência sobre as suas propriedades mecânicas e assim qualquer redução de seus valores pode implicar em perda de resistência mecânica. Assim, a ausência do efeito da temperatura sobre ME_{TRAT} pode explicar em parte o motivo

pelo qual as propriedades mecânicas dos painéis tratados foram pouco afetadas pela temperatura em comparação aos painéis testemunha, como poderá ser visto adiante.

As propriedades físicas dos painéis tratados também foram influenciadas pelo tempo do tratamento térmico. A Tabela 29 apresenta a média e o coeficiente de variação das propriedades físicas afetadas pelo tratamento, de acordo com o tempo. A tendência é de que com o aumento do tempo de tratamento, ocorre uma diminuição do inchamento, da absorção e da adsorção de água, ou seja, padrão similar ao observado com o aumento da temperatura.

TABELA 29 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.

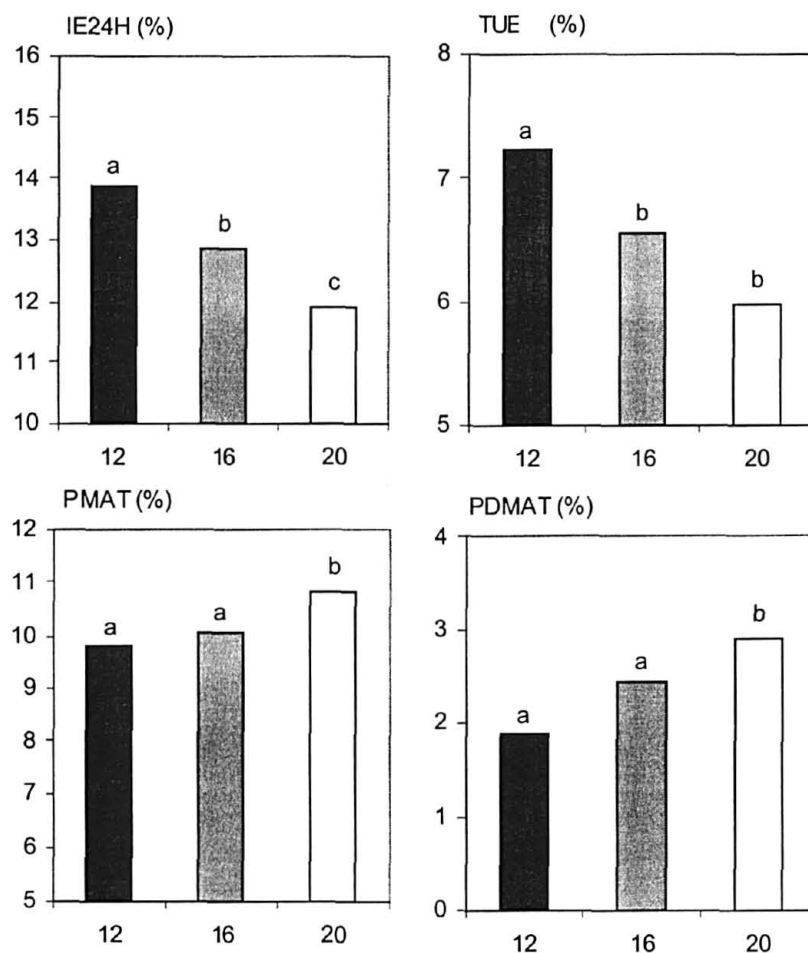
PROPRIEDADE	12 min		16 min		20 min	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)	μ	CV (%)
IE2H (%)	5,79	19,34	5,44	31,07	5,03	35,8
ABS2H (%)	14,81	19,18	14,33	4,89	13,90	19,35
IE24H (%)	13,89a	12,02	12,84	17,89	11,91	18,01
ABS24H (%)	39,90	14,24	41,66	17,52	39,79	25,63
TUE (%)	7,23	10,65	6,55	14,02	5,97	19,26
PMAT (%)	9,83	6,58	10,06	7,03	10,79	7,45
PDMAT (%)	1,89	25,32	2,44	21,76	2,89	17,45

A análise estatística (Anexo 3, Tabelas 12 e 13) identificou o efeito do tempo de tratamento apenas sobre IE24H, TUE, PMAT e PDMAT, não sendo observado efeito para as demais propriedades. Como pode ser observado no Gráfico 10, há uma tendência de melhoria das propriedades de estabilidade dimensional com o aumento do tempo de tratamento.

A separação das médias pelo teste de Tukey identificou três médias distintas para IE24H, sendo a menor obtida no tempo de tratamento de 20 minutos. Assim, quanto mais longo for o tratamento térmico, menor será o inchamento em espessura dos painéis.

Para TUE também foi identificado que quanto maior o tempo do tratamento menor será o seu valor, mas, no entanto, foram identificadas apenas duas médias distintas.

GRÁFICO 10 - EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

Pela análise do Gráfico 10, observa-se também que as variáveis relacionadas à perda de massa (PMAT e PDMAT) também foram influenciadas pelo tempo do tratamento. Assim, quanto mais longo o tratamento, maior será a perda de massa do painel, no entanto, não refletiu em redução da sua massa específica (ME_{TRAT}).

4.3.2 Efeito nas Propriedades Mecânicas

A média e o coeficiente de variação para as propriedades mecânicas dos painéis tratados e a testemunha são apresentados na Tabela 30. Observa-se por esta Tabela que o tratamento térmico implicou em pequena redução das propriedades mecânicas dos painéis em comparação com a testemunha.

TABELA 30 - VALORES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS.

PROPRIEDADES	TRATAMENTOS ⁽¹⁾						
	TESTE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
MOR// (MPa)	34,0 (10,9)	30,2 (13,1)	32,7 (14,3)	30,8 (8,6)	30,0 (8,7)	28,3 (12,7)	25,9 (18,9)
MOE// (MPa)	5.818,0 (4,8)	5.497,0 (10,4)	5.433,0 (19,1)	5.415,0 (7,8)	4.878,0 (19,8)	5.709,0 (6,5)	5.311,0 (11,6)
FM// (MPa)	961,0 (12,4)	865,0 (11,2)	949,0 (10,7)	888,0 (12,5)	822,0 (11,6)	806,0 (15,7)	741,0 (23,0)
MOR⊥ (MPa)	21,6 (7,6)	23,3 (4,4)	22,1 (7,0)	20,4 (9,9)	19,8 (16,1)	20,5 (14,8)	18,5 (8,8)
MOE⊥ (MPa)	2.468,0 (16,6)	2.648,0 (6,8)	2.575,0 (6,0)	2.572,0 (7,6)	2.616,0 (10,1)	2.688,0 (8,6)	2.565,0 (3,8)
FM⊥ (MPa)	611,0 (11,6)	671,0 (6,7)	634,0 (8,0)	590,0 (14,9)	569,0 (21,6)	579,0 (21,9)	531,0 (13,3)
LI (kPa)	529,0 (13,3)	557,0 (8,5)	557,0 (15,6)	534,0 (8,1)	537,0 (7,3)	534,0 (10,0)	558,0 (14,1)
COMP// (MPa)	17,8 (15,1)	17,2 (11,5)	15,0 (7,2)	14,6 (20,7)	16,1 (20,9)	16,6 (20,6)	16,7 (13,7)
MOECOMP// (MPa)	11.881,0 (8,5)	12.048,0 (10,2)	10.855,0 (5,3)	10.701,0 (13,6)	10.651,0 (19,8)	11.848,0 (17,5)	11.392,0 (13,1)
COMP⊥ (MPa)	18,0 (20,9)	17,1 (12,9)	15,5 (22,2)	16,8 (21,4)	15,6 (22,3)	15,6 (21,5)	14,7 (21,4)
MOECOMP⊥ (MPa)	12.161,0 (21,9)	11.688,0 (13,3)	10.973,0 (20,6)	11.594,0 (19,5)	11.482,0 (18,8)	11.072,0 (20,5)	9.976,0 (28,7)

NOTAS: (1) T1: 190°C, 12'; T2: 190°C, 16'; T3: 190°C, 20'; T4: 220°C, 12'; T5: 220°C, 16'; T6: 220°C, 20';

(2) Coeficiente de variação (%).

No entanto, não há uma tendência clara para este efeito, ou seja, maior temperatura e tempo do tratamento não implicam no incremento desta redução. Por outro lado, há tratamentos cujos valores das propriedades são superiores aos observados para a testemunha, como para o MOR⊥, MOE⊥, FM⊥ e LI.

Essa variação de comportamento das propriedades refletiu em variação da eficiência do tratamento (Ef), cujos resultados são apresentados na Tabela 31. As diferenças mais acentuadas são observadas para as propriedades do tratamento T6, cujas condições foram as mais severas (220°C, 20'). Nota-se que o comportamento das diferentes propriedades é muito distinto, sendo evidente que algumas são mais resistentes ao tratamento, tais como FM \perp e LI, enquanto outras são mais sensíveis, tais como MOR// (-12,7%), FM// (-12,0%) e COMP \perp (-11,8%). No geral, o tratamento térmico significou uma redução média de 5,9% das propriedades mecânicas dos painéis, em termos relativos.

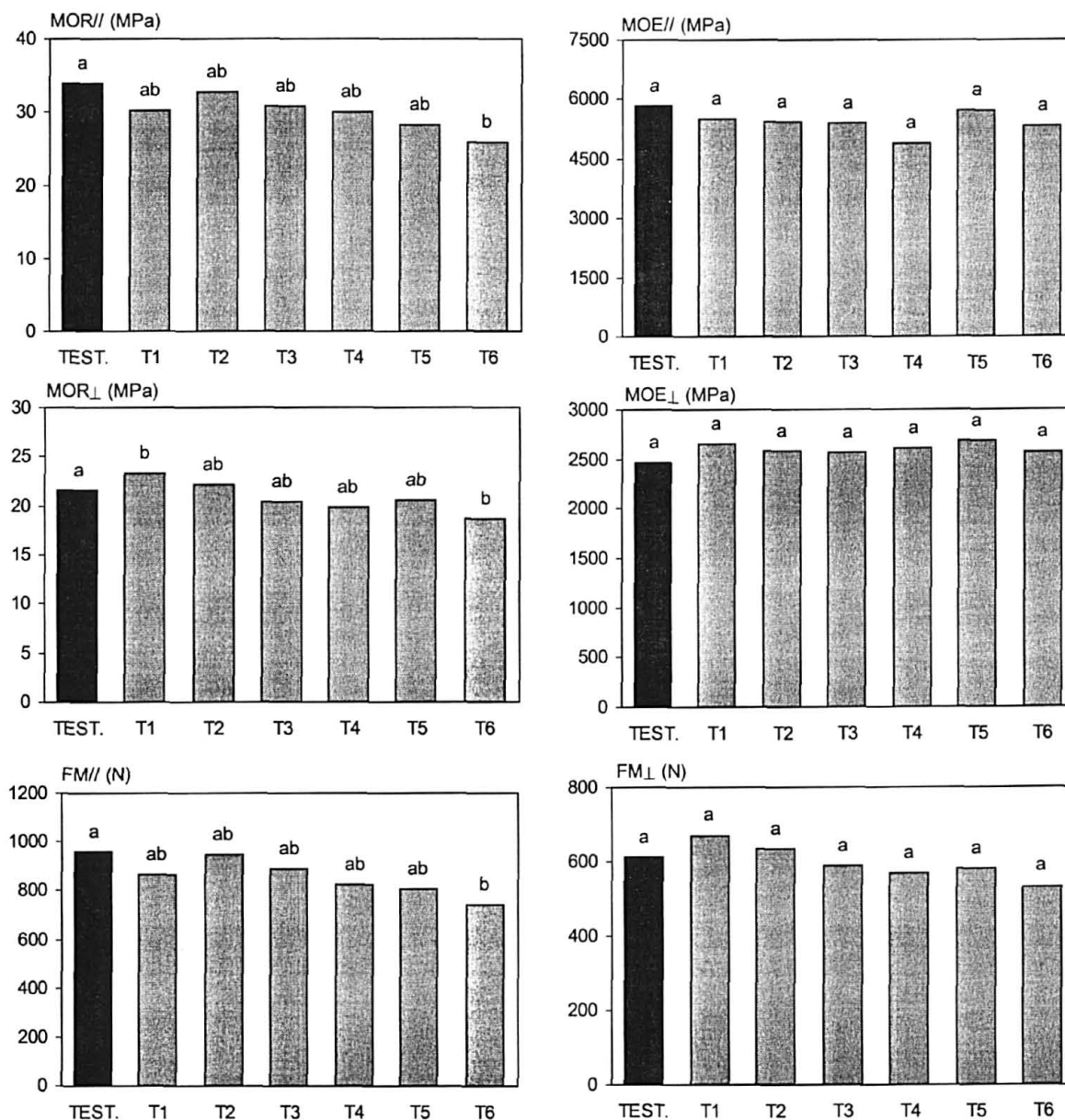
TABELA 31 - EFICIÊNCIA (%) DO TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS OSB.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO						MÉDIA
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
MOR//	-11,1	-3,7	-9,3	-11,8	-16,6	-23,8	-12,7
MOE//	-5,5	-6,6	-6,9	-16,2	-1,9	-8,7	-7,6
FM//	-10,0	-1,2	-7,6	-14,4	-16,1	-22,9	-12,0
MOR \perp	7,9	2,3	-5,5	-8,5	-5,2	-14,1	-3,9
MOE \perp	7,3	4,3	4,2	6,0	8,9	3,9	5,8
FM \perp	9,9	3,9	-3,4	-6,8	-5,1	-12,9	-2,4
LI	5,3	5,5	1,0	1,6	1,1	5,5	3,4
MOECOMP//	1,4	-8,6	-9,9	-10,4	-0,3	-4,1	-5,3
COMP//	-3,0	-15,4	-18,1	-9,5	-6,5	-5,9	-9,7
MOECOMP \perp	-3,9	-9,8	-4,7	-5,6	-9,0	-18,0	-8,5
COMP \perp	-5,1	-13,9	-6,7	-13,3	-13,3	-18,2	-11,8

NOTAS: (1) T1: 190°C, 12'; T2: 190°C, 16'; T3: 190°C, 20'; T4: 220°C, 12'; T5: 220°C, 16'; T6: 220°C, 20'; Valores negativos denotam efeito deletério; valores positivos efeito benéfico.

A despeito do impacto do tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas, a análise estatística (Anexo 2, Tabela 7) indicou a separação de médias apenas para as propriedades MOR//, FM// e MOR \perp justamente as propriedades mais afetadas. Para as duas primeiras identificou-se diferença estatisticamente significativa entre a testemunha e o T6, enquanto para a última a diferença ocorreu entre T1 e T6. (Gráfico 11).

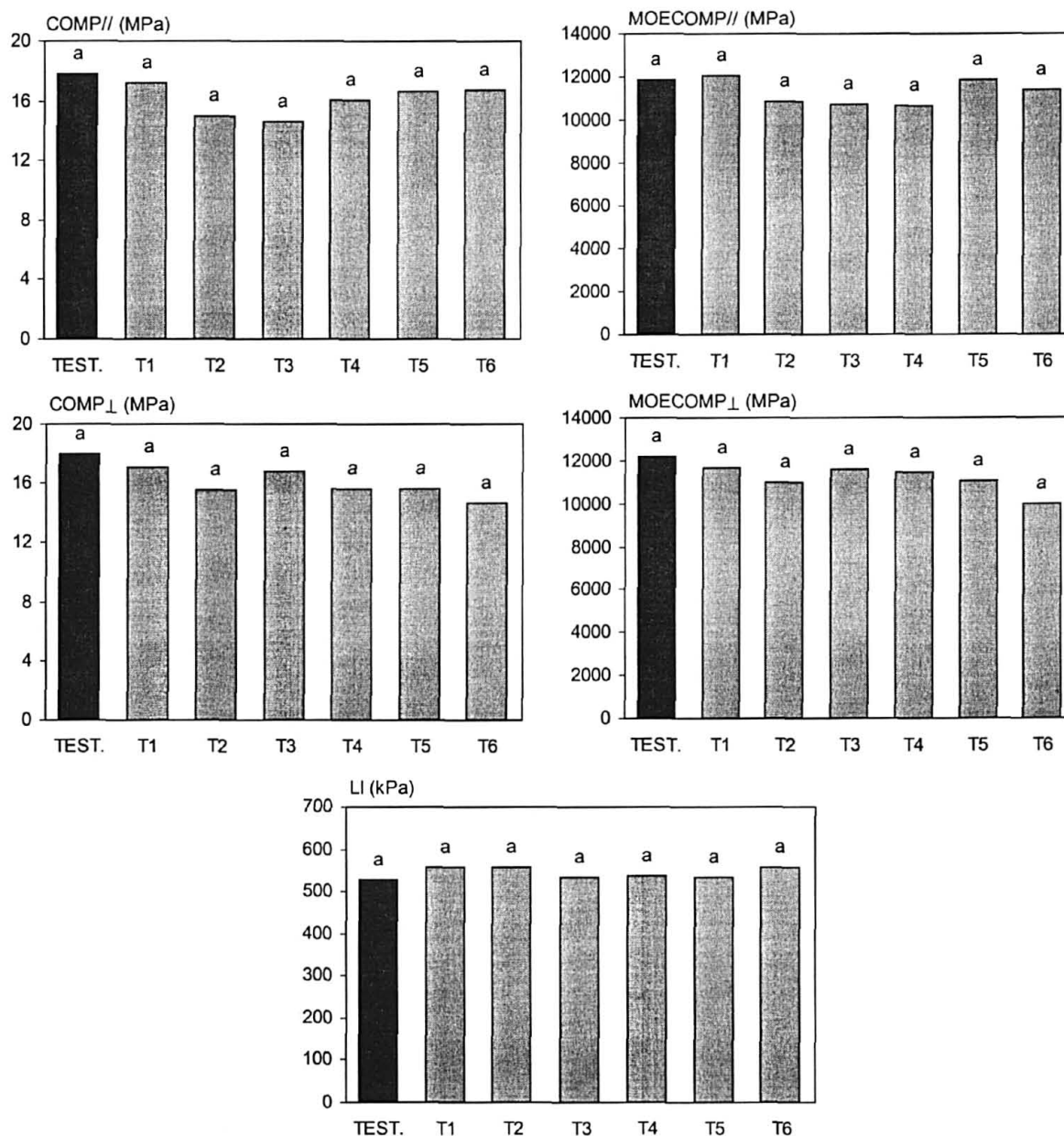
GRÁFICO 11 - COMPARAÇÃO PARA VALORES DE FLEXÃO ESTATICA PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

As demais propriedades dos painéis tratados, a despeito do efeito deletério do tratamento, não foram estatisticamente distintas das observadas para a testemunha (Anexo 2, Tabelas 7 e 8). Assim, embora tenha sido detectada redução das propriedades mecânicas, estas não foram estatisticamente significativas (Gráfico 12). Isto indica que o tratamento térmico empregado afetou pouco as propriedades mecânicas dos painéis.

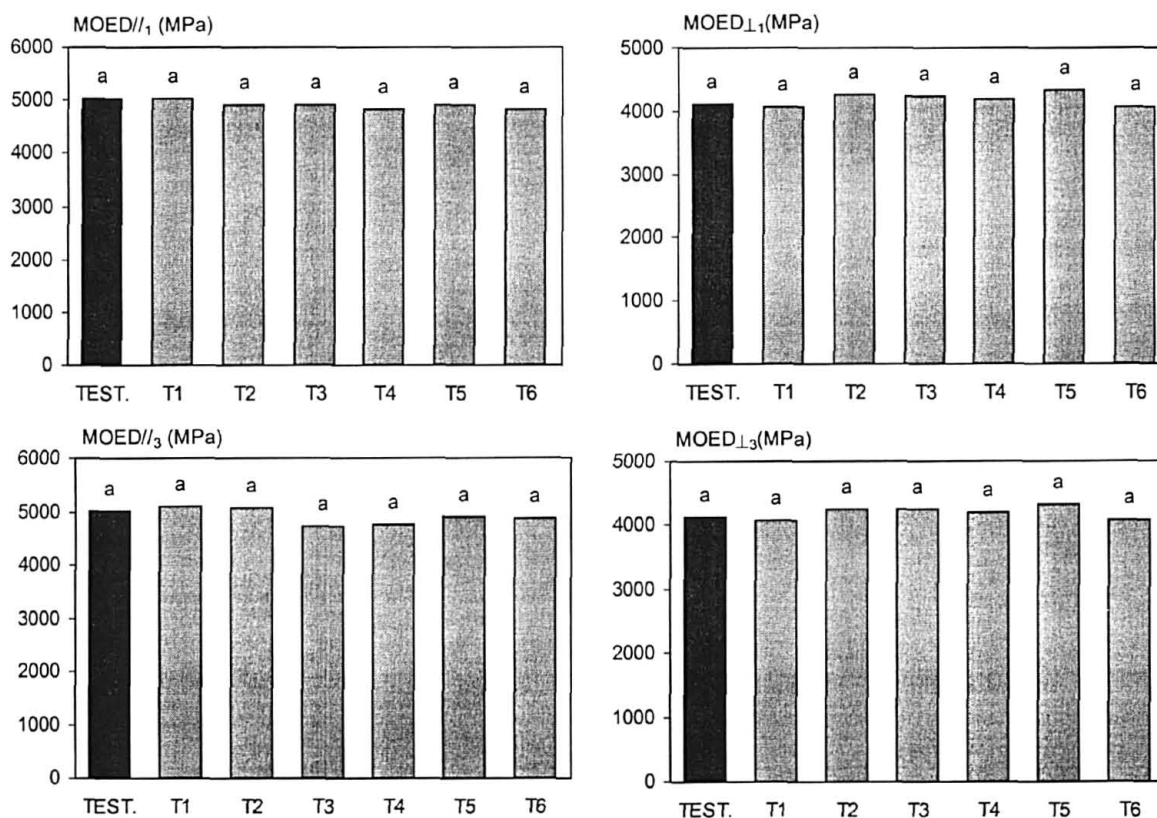
GRÁFICO 12 - COMPARAÇÃO PARA COMPRESSÃO E LIGAÇÃO INTERNA ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

O Gráfico 13 apresenta os resultados do módulo de elasticidade dinâmico, e observa-se não houve diferença estatística entre os tratamentos (Anexo 2, Tabela 7). A ausência de diferença estatística foi observada tanto para os valores obtidos 1 dia após tratamento ($MOED_{//1}$ e $MOED_{\perp 1}$) quanto para aqueles determinados após a climatização do painel ($MOED_{//3}$ e $MOED_{\perp 3}$).

GRÁFICO 13 - COMPARAÇÃO PARA VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DOS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

Deste modo, os valores de $MOED_{//3}$ e $MOED_{\perp3}$ não são estatisticamente diferentes dos valores observados para $MOED_{//1}$ e $MOED_{\perp1}$, indicando que a avaliação precoce desta propriedade 1 dia após tratamento, já é possível estimar quais serão os valores após a climatização.

Uma explicação detalhada para esta baixa, ou mesmo, quase ausência de redução das propriedades mecânicas dos painéis tratados deve levar em conta os dois principais componentes do painel: a madeira e o adesivo. As reações de degradação térmica da madeira são altamente influenciadas pelo tempo, temperatura, pressão, umidade e forma de tratamento (KUBOJIMA et al. 2000; KOZLIK, 1974; STAMM, 1964).

O tratamento térmico foi aplicado em condições relativamente amenas, quais sejam: curto período de tempo, pressão atmosférica e baixo teor de umidade. Sob estas condições, as alterações nas características químicas dos constituintes do painel foram relativamente baixas como será visto na análise química. O comportamento mecânico da madeira tratada tem sido observado como diretamente relacionado às alterações químicas impostas, como pôde ser observado por CURLING et al. (2001) para a flexão estática e CHRISTIANSEN (1997) para a tenacidade, ambos em relação ao conteúdo de hemiceluloses.

Os valores de MOE, principalmente no sentido perpendicular, foram ligeiramente superiores aos valores observados para a testemunha. Alguns trabalhos têm relatado este comportamento, ou seja, aumento nos valores do MOE em função do tratamento térmico. YILDIZ et al. (2002) trataram madeira de beech à 200°C por 10 horas, e observaram valores 15% superiores em comparação à madeira não tratada. KUBOJIMA et al. (2000) observaram a tendência de aumento do módulo estático de Young para tratamento até 4 horas, seguida de uma redução em função do prolongamento do tratamento, enquanto que para o MOR foi observada mesma tendência, mas o decréscimo ocorre já a partir de 1 hora de tratamento.

Observa-se também que o LI apresentou por vezes valores superiores aos observados na testemunha (Gráfico 14). CHOW e PICKLES (1971) argumentam que durante o tratamento térmico da madeira podem ocorrer reações de polimerização dos extrativos e da lignina, que podem gerar produtos com forte natureza adesiva, aumentando assim o número de uniões coladas. Esta hipótese também pode ser levada em consideração para se explicar o baixo impacto do tratamento sobre o comportamento mecânico dos painéis.

BACK (1987) argumenta que durante o tratamento térmico, ao qual os painéis de fibra (hardboard) são submetidos, são produzidas ligações de entrelaçamento dos polímeros, que somando-se às ligações adesivas, incrementam

as propriedades mecânicas. Embora haja diferenças significativas do ponto de vista da característica do material, os polímeros presentes nas partículas do painel OSB também podem formar estas ligações cross-linking, que inclusive serão discutidas mais adiante.

Deste modo, diante dos resultados de LI supõe-se que as ligações adesivas não foram comprometidas pelo tratamento térmico, evidenciando a boa resistência dos adesivos, fenólico e isocianato, empregados na fabricação dos painéis. LANDROCK (1985) afirma que para uma resina ser resistente à alta temperatura, deve apresentar alto ponto de amolecimento e ser resistente à oxidação, e que tais características estão presentes nas resina de base fenólica.

UMEMURA e KAWAI (2002) estudaram a resistência à degradação térmica da resina à base de isocianato em quatro temperaturas: 260°C a 320°C, em intervalos de 20°C, por até 300 minutos. Os resultados indicaram que a perda de massa da resina é da ordem de 7% quando submetido à 260°C por 20 minutos, maior tempo empregado no presente trabalho. A perda de massa não passou de 15% aos 300 minutos de tratamento. Trata-se, portanto, de uma resina de muito boa estabilidade frente à ação da temperatura, o que pode explicar os valores obtidos para LI dos painéis tratados.

No ensaio de compressão a força é aplicada paralelamente ao eixo do corpo-de-prova e perpendicularmente às uniões adesivas, estabelecidas entre as partículas dos painéis, que então estão sobre a ação de forças de tração. Em última análise a resistência à compressão é parcialmente dependente da resistência das uniões adesivas, que é medida por meio do ensaio de LI. Supõe-se, então, que qualquer alteração nos valores de LI, pode refletir nos valores de COMP dos painéis. Como apresentado no Anexo 2, Tabela 8 nenhuma destas propriedades foi afetada pelo tratamento térmico, o que corrobora a suposição feita.

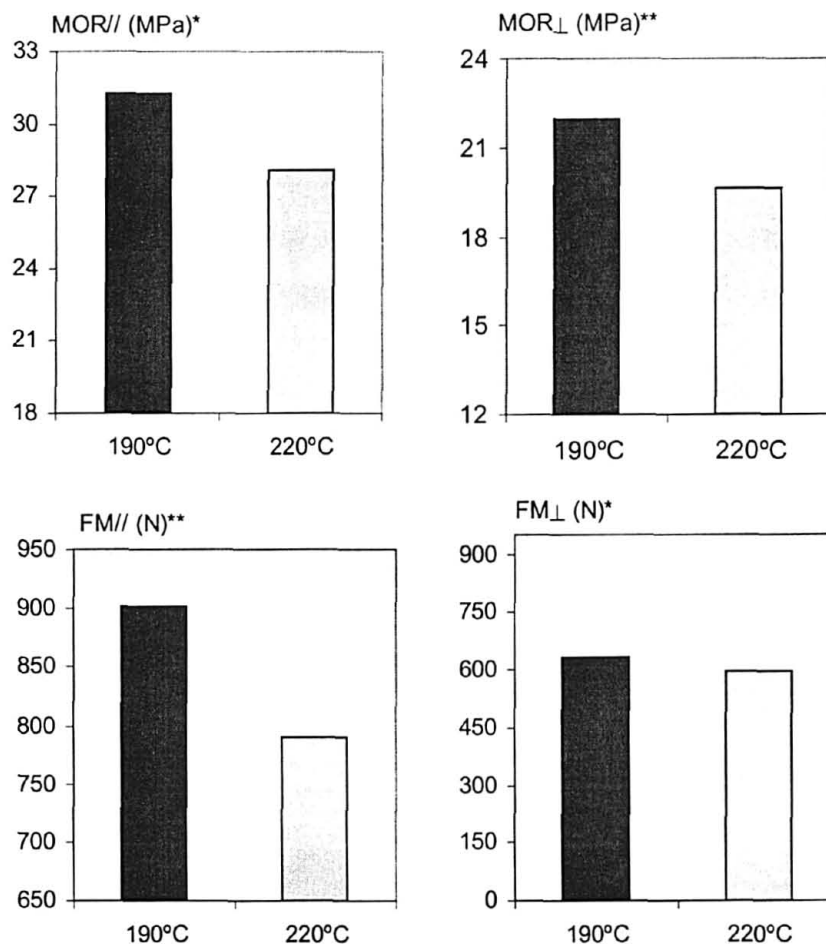
A Tabela 32 apresenta a média e o coeficiente de variação das propriedades mecânicas, afetadas pelo tratamento, para os painéis tratados de acordo com a temperatura. Por esta Tabela identifica-se uma tendência de redução dos valores das propriedades de flexão estática em função do aumento da temperatura de tratamento. O resultado da análise de variância fatorial do efeito da temperatura e do tempo (Gráfico 14) sobre as propriedades mecânicas é apresentado no Anexo 3, Tabela 14. De fato, todas as propriedades da Tabela 32 foram afetadas significativamente pela temperatura do tratamento.

TABELA 32 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS OSB TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.

PROPRIEDADE	190 °C		220 °C	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)
MOR// (MPa)	31,22	12,11	28,04	14,16
FM// (N)	901,18	11,51	790,71	16,61
MOR \perp (MPa)	21,97	8,78	19,63	13,65
FM \perp (N)	631,67	10,95	560,13	18,79

Evidenciou-se que a temperatura maior (220°C) reduziu os valores destas quatro propriedades entre 10% e 12%, sendo a mais afetada a FM// com 12,3%. No ensaio estático a redução não foi acentuada e de certo modo, os painéis resistiram adequadamente ao tratamento térmico.

GRÁFICO 14 - EFEITO DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA.



NOTA: *, ** significativo pela ANOVA ao nível de $\alpha = 0,05$ e $0,01$, respectivamente.

O tratamento térmico aplicado na madeira torna-a menos flexível, ou seja, altera o seu comportamento frente aos esforços mecânicos. Pelo ensaio de flexão estática pode ser avaliar o comportamento de determinado material. Os resultados observados indicam a influência da temperatura sobre MOR e FM, em ambos os sentidos, mas ausência de efeito sobre o MOE, podem ser explicados por este motivo.

Um sólido linearmente elástico é aquele caracterizado por um regime elástico estritamente linear, além de ser também pouco flexível - apresentando baixa capacidade de deformação plástica. A ruptura neste tipo de sólido ocorre logo após o fim de regime elástico, sendo usualmente uma ruptura abrupta, ou seja, o material

é do tipo quebradiço. Por apresentar alta resistência à deformação elástica este tipo de sólido apresenta um alto MOE (alta relação σ/ϵ), mas por outro lado a carga máxima de ruptura (FM) não é elevada.

Deste modo, supõe-se que os painéis tratados passaram a apresentar o comportamento mecânico próximo ao do sólido linearmente elástico. Isto porque, o tratamento térmico implicou em redução de FM, e consequentemente de MOR, mas, no entanto, não reduziu o MOE, ou seja, a sua capacidade de resistir à deformação elástica se manteve.

KIM et al. (1998) observaram que o trabalho na carga máxima foi a propriedade mais afetada, enquanto que MOE apresentou redução menos acentuada. KALLANDER et al. (2001) avaliando o efeito da secagem à alta temperatura também fizeram observações similares ao do presente trabalho, ou seja, o MOR foi mais afetado que o MOE, conforme pode ser visto na Tabela 2. MATSUMOTO et al. (2001) observaram que o MOE não é afetado à 160°C, enquanto que o MOR já o é a partir de 120°C. BENGTSSON et al. (2002) também observaram que o MOE de peças estruturais de madeira maciça foi pouco afetado - redução de apenas 3,5% - pelo tratamento térmico à 220°C, enquanto o MOR foi reduzido em até 50%.

A Tabela 33 apresenta a média e o coeficiente de variação de propriedades de flexão, afetadas pelo tratamento térmico, dos painéis tratados de acordo com o tempo. Observa-se que não há uma tendência clara da variação das médias com o tempo.

TABELA 33 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS OSB TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.

PROPRIEDADE	12 min		16 min		20 min	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)	μ	CV (%)
MOR// (MPa)	30,07	12,11	30,50	15,05	28,33	16,02
FM// (MPa)	843,96	11,18	878,06	15,06	815,00	19,29
MOR \perp (MPa)	21,57	13,54	21,32	11,44	19,51	10,30
FM \perp (MPa)	620,06	16,60	606,77	15,87	560,77	14,62

De fato, diferentemente do ocorrido com o efeito da temperatura, onde quatro propriedades mecânicas foram afetadas, a análise estatística (Anexo 3, Tabela 14) não identificou efeito significativo do tempo do tratamento sobre as propriedades mecânicas. Deste modo, em 12 minutos de tratamento já se observa alterações das propriedades, e que a continuidade do tratamento até 20 minutos não altera significativamente a resistência mecânica dos painéis. O que se esperava é que com o aumento da duração do tratamento térmico, ocorreria redução dos valores das propriedades. Há casos como para FM// que seus valores a 16 minutos são ligeiramente superiores que a 12 minutos.

Os resultados apresentados diferem parcialmente dos obtidos por HSU et al. (1989). Os autores aplicaram tratamento térmico em painéis wafer e observaram, embora sem comprovação estatística, que o MOR não foi afetado pelo tempo do tratamento, mas foi observada uma pequena elevação em comparação aos painéis não-tratados.

Analisando-se das propriedades mecânicas e físicas à luz do atendimento à norma técnica CSA 0437.0 algumas observações podem ser feitas. Todos os painéis, testemunha e tratados, atenderam aos requerimentos mínimos relativos às propriedades mecânicas, mas apenas os painéis tratados atenderam também ao exigido para o IE24H, uma vez que a testemunha apresentou IE24H ao redor de 19%.

No entanto, observa-se que as propriedades dos painéis tratados, para todos os tratamentos, foram classificadas distintamente, ora atendiam à classe O-2, ora à O-1 (Tabela 34). A exceção foi o tratamento T1 cujas propriedades foram todas classificadas como O-2, a mais exigente. Esta distinção na classificação não é, certamente, uma limitação para a colocação destes painéis no mercado, uma vez que, ocorreu em no máximo duas das seis propriedades avaliadas pela norma. O mais significativo foi que a adoção do tratamento térmico reduziu o IE24H para valores que atendem à norma.

TABELA 34 - CLASSIFICAÇÃO DOS PAINÉIS DE ACORDO COM A NORMA CSA 0437.0.

PROPRIEDADE	TRATAMENTOS						
	TEST.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
MOR//	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-1	O-1
MOE//	O-2	O-2	O-1	O-1	O-1	O-2	O-1
MOR⊥	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2
MOE⊥	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2
LI	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2
IE24H	⊙	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2

NOTAS: O-2 mais exigente que classe O-1, à exceção para LI e IE24H que estabelecem o mesmo valor em ambas classes.

⊙, indica não atendimento à norma.

4.3.3 Efeito nas Propriedades Colorimétricas

A Tabela 35 apresenta a média e o coeficiente de variação para os parâmetros colorimétricos dos painéis tratados e da testemunha. Os dados permitem supor que a claridade (L), saturação da cor (C) e o ângulo da tinta (h) são as propriedades mais afetadas pelo tratamento térmico.

TABELA 35 - MÉDIA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS.

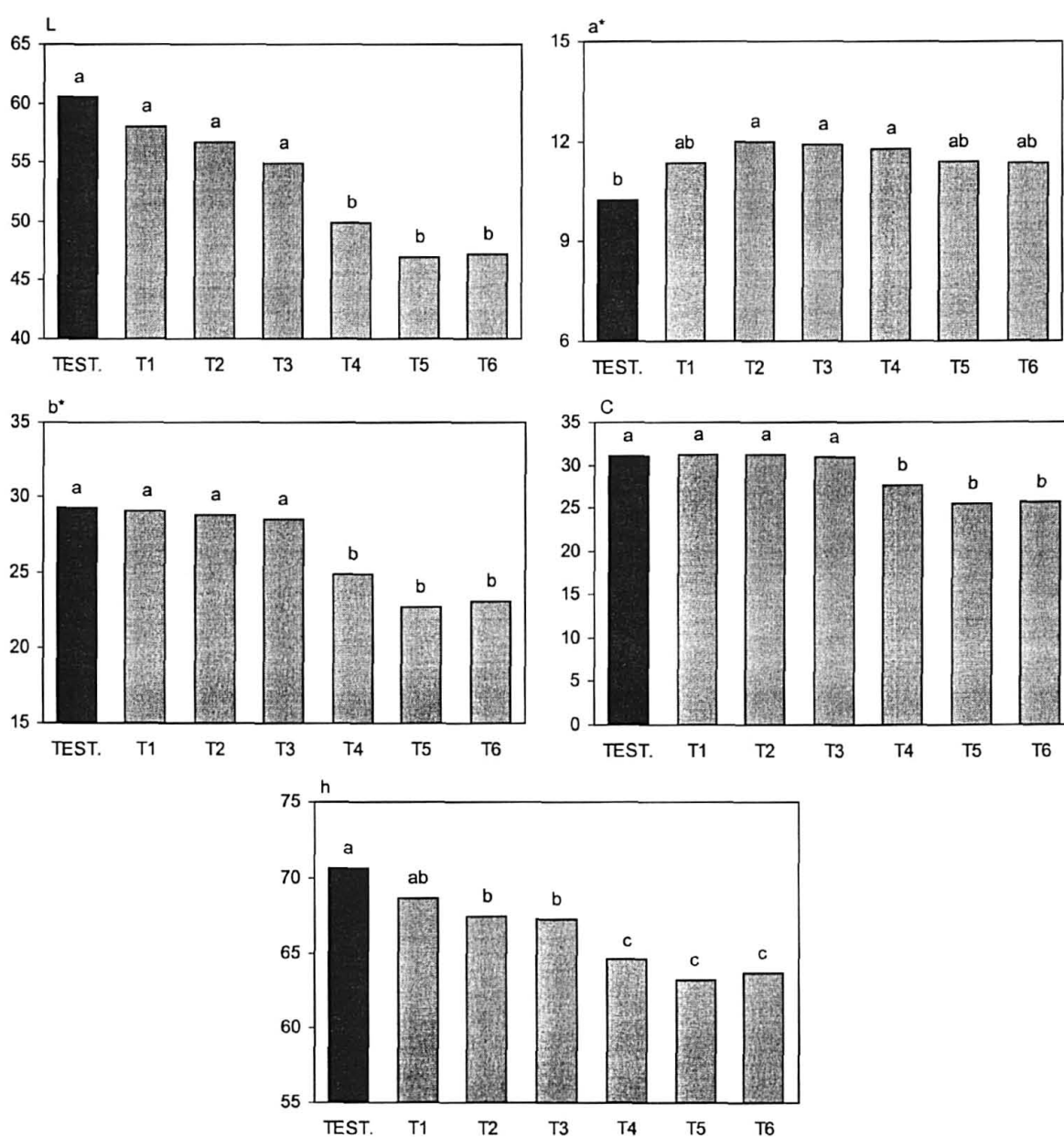
PROPRIEDADE ⁽¹⁾	TRATAMENTOS						
	TEST.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
L	59,09 (2,7) ⁽²⁾	57,97 (3,9)	56,74 (3,1)	54,94 (1,8)	49,89 (7,0)	47,03 (7,0)	47,21 (6,3)
a*	10,49 (4,7)	11,35 (4,1)	11,97 (8,7)	11,91 (3,1)	11,79 (4,1)	11,41 (5,3)	11,36 (2,5)
b*	29,16 (3,5)	29,06 (3,6)	28,84 (2,9)	28,50 (2,8)	24,90 (7,9)	22,72 (9,6)	23,05 (8,2)
C	31,01 (3,4)	31,21 (3,1)	31,24 (3,4)	30,90 (2,3)	27,57 (6,9)	25,44 (8,6)	25,71 (6,8)
h	70,18 (1,0)	68,64 (1,5)	67,48 (2,2)	67,25 (1,4)	64,56 (2,2)	63,14 (2,1)	63,62 (2,6)

NOTA: (1) L: claridade; a*: parâmetro a; b*: parâmetro b; C: saturação; h: ângulo da tinta.

(2) Coeficiente de variação (%).

Essa tendência foi confirmada por meio da análise estatística (Anexo 2, Tabela 9) cujos resultados são ilustrados no Gráfico 15. Observa-se que para todas as propriedades houve distinção de médias entre a testemunha e os painéis tratados. No entanto, esta distinção ficou mais evidente apenas para o conjunto de painéis tratados à 220°C, enquanto que a 190°C apenas a variável h foi distinta em relação à testemunha.

GRÁFICO 15 - COMPARAÇÃO PARA PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA, SEM TRATAMENTO.

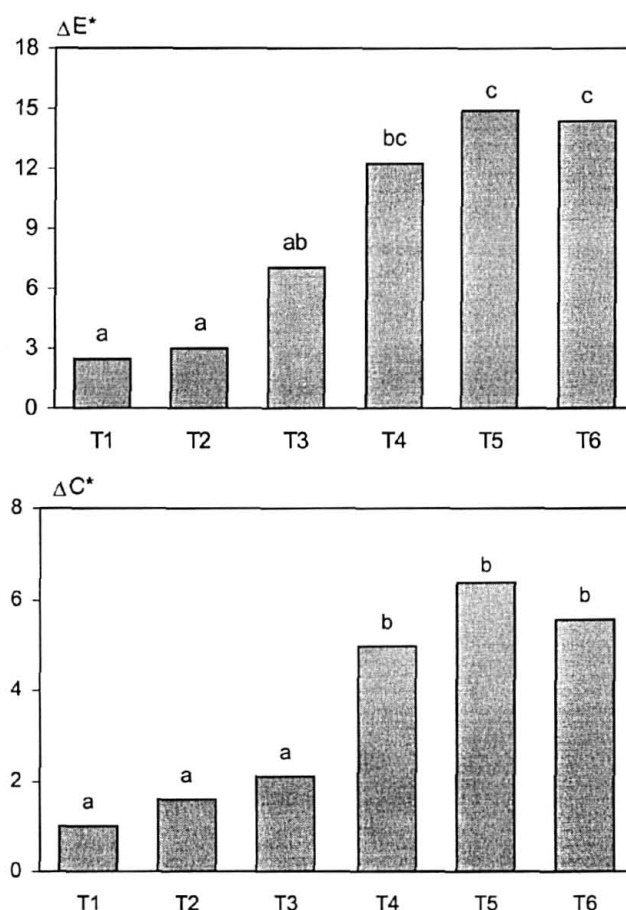


NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

Evidencia-se também uma tendência de redução de L, quando se compara com a testemunha, à medida que temperatura e tempo aumentam. O parâmetro expressa a claridade do material, variando de 0 (preto absoluto) a 100 (branco total). A principal evidência é o escurecimento da superfície dos painéis tratados. Segundo CHOW e MUKAI (1972) o escurecimento está em função da alteração da cor da α -celulose, provavelmente pela oxidação, que da cor branca torna-se ao final quase totalmente preto. Por outro lado, CHARRIER et al. (2002) argumentam que esta alteração também pode ser ocasionada pela oxidação de outras substâncias, bem como pela migração de extrativos, enquanto que ISHIGURI et al. (2003) sugerem que os extrativos possuem frações químicas que são alteradas durante o tratamento térmico, modificando a cor.

O escurecimento do painel pode ser analisado também pelas alterações observadas no eixo verde-vermelho (a^*) e no eixo azul-amarelo (b^*). O parâmetro a^* deslocou-se positivamente, embora em pequena intensidade, indicando que os painéis tornaram-se mais avermelhados, enquanto que o parâmetro b^* , foi reduzido, mais acentuadamente, indicando que o painel tornou-se mais azulado. As alterações dos parâmetros L, a^* e b^* determinaram a alteração total da cor (ΔE^*) e da saturação da cor dos painéis tratados (ΔC^*), em comparação aos painéis testemunha, como pode ser visto no Gráfico 16.

GRÁFICO 16 - ALTERAÇÃO DA COR (ΔE^*) E DA SATURAÇÃO (ΔC^*) DOS PAINÉIS TRATADOS EM RELAÇÃO À TESTEMUNHA.



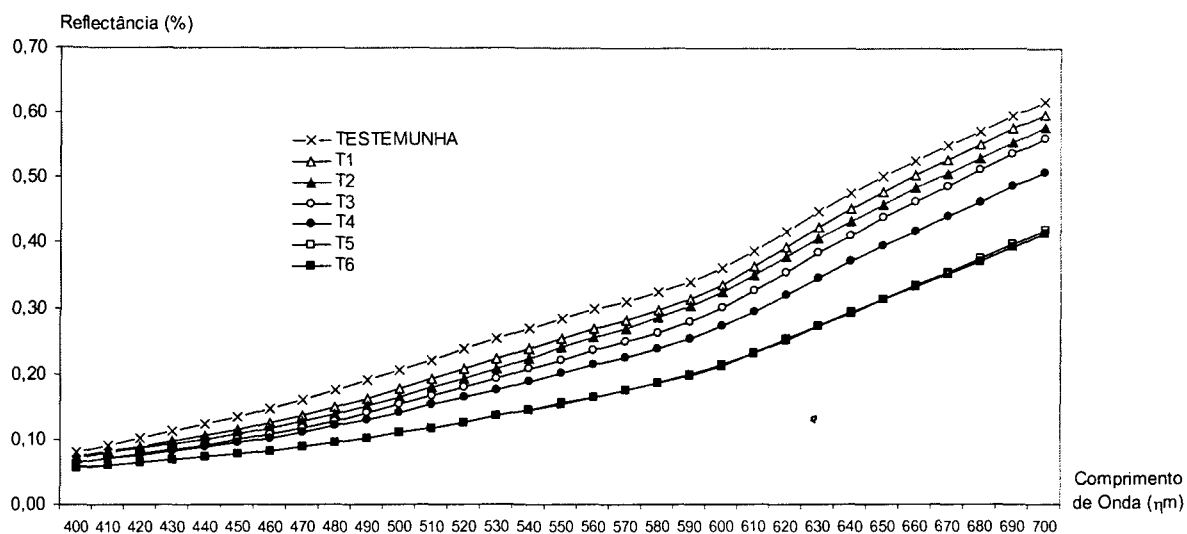
NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

Como pode ser visto no Gráfico 16, o tratamento térmico altera significativamente (Anexo 2, Tabela 10) a cor do painel bem como sua saturação. Esses parâmetros parecem ser mais influenciados pela temperatura que pelo tempo do tratamento térmico, uma vez que há uma divisão clara entre os painéis tratados a 190°C (T1, T2 e T3) e os tratados à 220°C (T4, T5 e T6).

O Gráfico 17 apresenta a reflectância dos painéis de acordo com o tratamento. Observa-se por este Gráfico que há uma redução gradativa da reflectância à medida que se aumenta a temperatura e o tempo de tratamento. Entretanto, não está claro que essa redução ocorre sobre o efeito da temperatura ou do tempo, uma vez que não há uma separação clara. Praticamente não se destingue

T5 e T6, embora sejam da mesma temperatura (220°C), os tempos são distintos (16 e 20 min.). Isto pode indicar que o tempo não tem efeito sobre esta propriedade.

GRÁFICO 17 - REFLECTÂNCIA DOS PAINÉIS DE ACORDO COM TRATAMENTO.



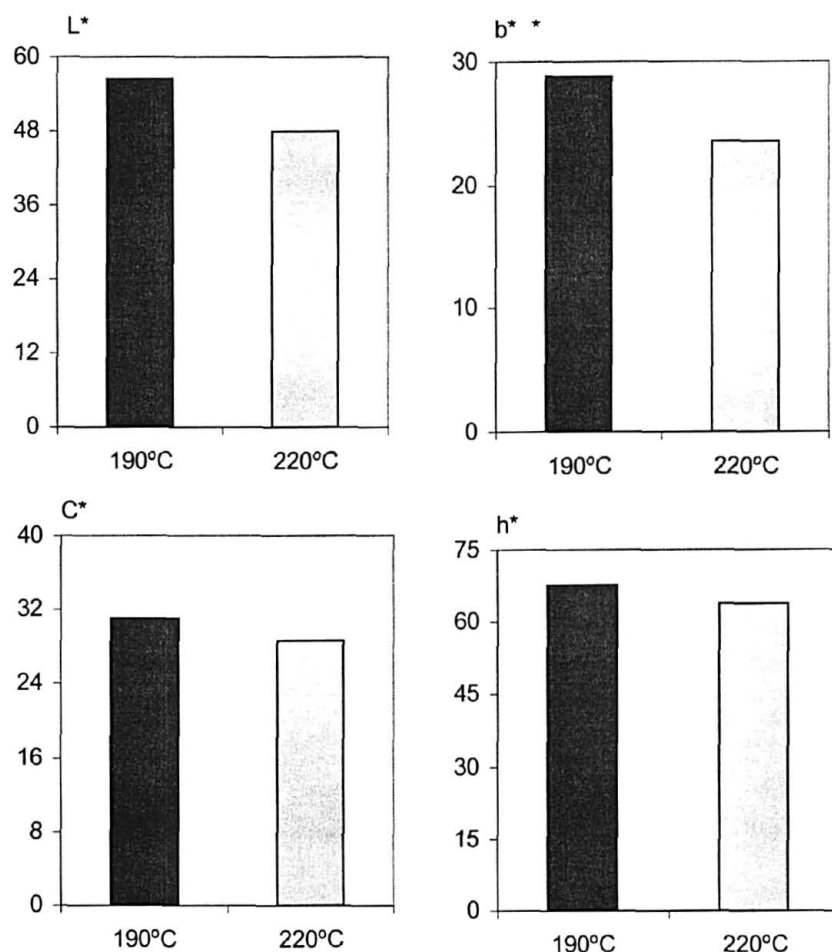
A Tabela 36 apresenta a média e o coeficiente de variação das propriedades colorimétricas dos painéis tratados, afetadas pelo tratamento térmico, de acordo com a temperatura. Pode-se observar uma tendência de redução dos valores das propriedades colorimétricas com o aumento de temperatura do tratamento.

TABELA 36 - PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.

PROPRIEDADE	190 °C		220 °C	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)
L	56,55	3,70	48,04	6,95
a*	11,74	6,05	11,36	2,38
b*	28,79	3,03	23,55	9,09
C	31,11	2,86	28,67	10,29
h	67,78	1,87	63,77	2,37
ΔE*	4,50	43,32	13,91	26,82
ΔC*	1,91	38,91	5,74	30,31

No Gráfico 18 são apresentados os resultados de acordo com a temperatura dos tratamentos e a tendência foi comprovada estatisticamente (Anexo 3, Tabela 16) e a temperatura do tratamento teve efeito sobre L^* , b^* , C e h , de modo que à 220°C os valores foram inferiores aos observados à 190°C, mas não teve efeito sobre a^* .

GRÁFICO 18 - PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS DOS PAINÉIS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.



NOTA: * significativo pela ANOVA ao nível de $\alpha = 0,05$.

A interpretação destes resultados permite que algumas conclusões sejam feitas. Os painéis tratados a 220°C tornam-se mais escuros que os tratados a 190°C, fato este evidenciado visualmente também pela redução de L^* . Quanto mais próximo de 0 (preto absoluto) mais escuro é o objeto, e isto foi de fato observado, haja vista que o L^* foi de 56 para 48 com aumento da temperatura para 220°C.

Outro aspecto evidente também é que a cor dos painéis tratados variou apenas no eixo azul-amarelo (parâmetro b^*), não sendo afetada no eixo do vermelho-verde (parâmetro a^*). Houve também redução da saturação da cor dos painéis tratados, evidenciado pela diminuição de C . Todas estas alterações determinaram que a cor dos painéis tratados a 220°C fosse distinta dos painéis tratados à 190°C, evidenciado pelo aumento de ΔE^* . BOURGOIS et al. (1991) observam que as alterações mais significativas destes parâmetros ocorrem na faixa de temperatura de 210-240°C, o que explica as diferenças encontradas no presente trabalho para todos os parâmetros entre 190°C e 220°C.

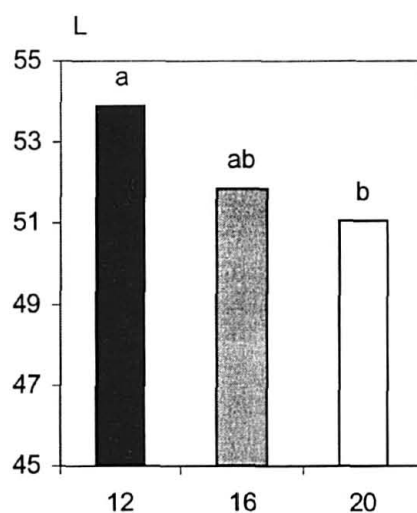
Na Tabela 37 são apresentados a média e o coeficiente de variação das propriedades colorimétricas dos painéis tratados, afetadas pelo tratamento, de acordo com o tempo. À medida que aumenta o tempo de tratamento há uma tendência de redução de algumas dessas propriedades (L e b^*) enquanto para outras não há uma tendência clara (a^* e h). Por outro lado os valores das propriedades que avaliam as alterações de cor do painel (ΔE^* e ΔC^*) são incrementados, indicando que o tempo de tratamento possa ter efeito na alteração da cor dos painéis.

TABELA 37 - PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.

PROPRIEDADE	12 min		16 min		20 min	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)	μ	CV (%)
L	53,93	9,38	51,88	5,66	51,07	8,93
a^*	11,56	4,33	11,69	7,36	11,63	3,65
b^*	26,98	9,75	25,77	13,81	25,77	12,26
C	29,38	8,13	28,34	12,14	28,30	10,57
h	66,60	3,65	65,30	4,04	65,43	3,48
ΔE^*	7,60	-	9,24	-	10,77	-
ΔC^*	3,24	-	4,30	-	3,93	-

A análise estatística (Anexo 3, Tabela 16) identificou o efeito do tempo de tratamento apenas sobre a claridade do painel (L) (Gráfico 19). Assim, o comportamento das propriedades colorimétricas, em relação ao tempo do tratamento, é similar ao observado para as propriedades mecânicas. Isto implica que as alterações observadas em relação à temperatura já estão presentes com 12 minutos e com o prolongamento deste tempo não se evidencia um incremento destas alterações.

GRÁFICO 19 - EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO (MIN) NA CLARIDADE DOS PAINÉIS.



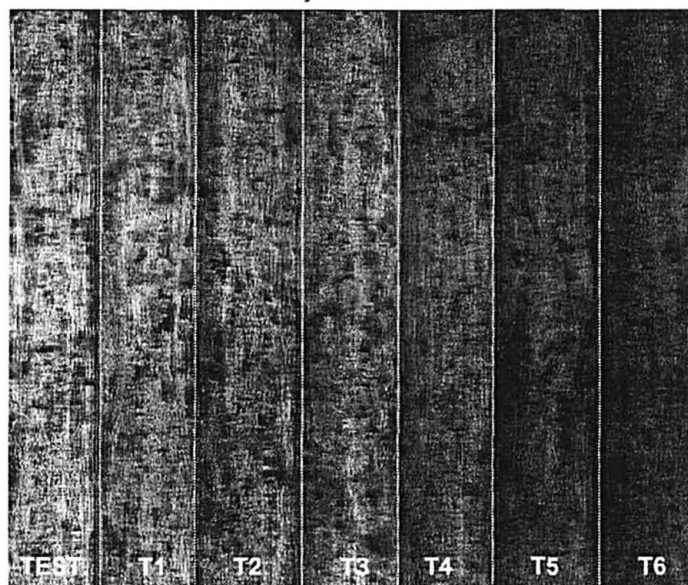
NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

As variáveis de alteração da cor dos painéis (ΔE^* e ΔC^*) para os painéis tratados foram sensíveis à temperatura, mas não ao tempo do tratamento, conforme a análise estatística. (Anexo 3, Tabela 16). Estes resultados são distintos dos observados por SUNDQVIST (2002), segundo os quais o tempo foi o fator determinante para a mudança da cor de birch tratada termicamente.

Alterações na cor do painel já eram esperadas, uma vez que é evidente que todo tratamento térmico causa escurecimento da madeira. Este escurecimento foi claramente notado na superfície do painel. Procurou-se, então, avaliar até que

profundidade esta alteração poderia ser notada. O corte das amostras evidenciou que a profundidade do escurecimento vai aumentando à medida que se aumenta a temperatura e o tempo do tratamento, chegando a atingir toda a extensão da espessura do painel, como pode ser notado na Figura 32.

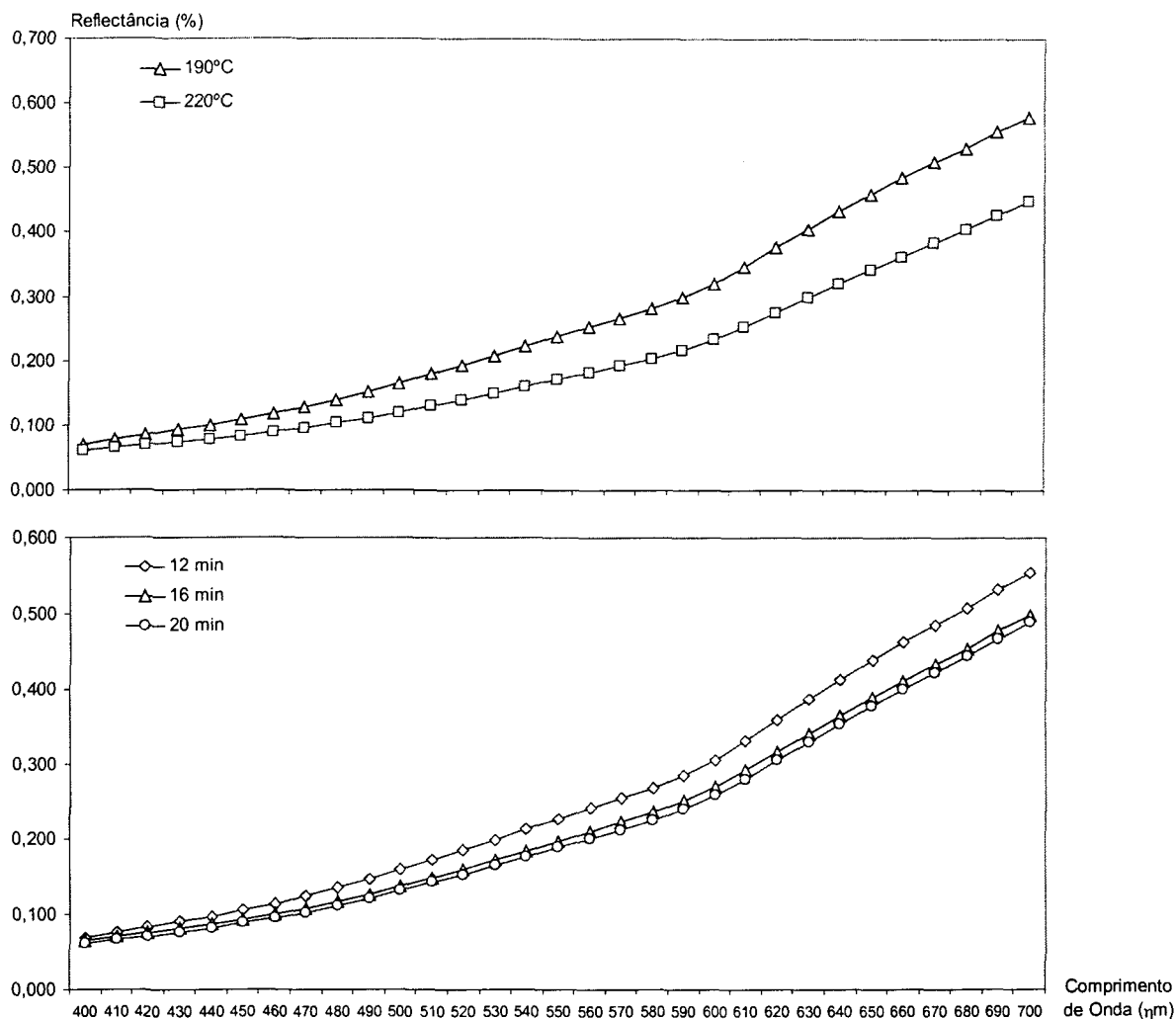
FIGURA 32 - PERFIL DA ESPESSURA DOS PAINÉIS TRATADOS EM COMPARAÇÃO AO PAINEL TESTEMUNHA.



O Gráfico 20 apresenta os dados de reflectância dos painéis tratados para vários comprimentos de onda, de acordo com a temperatura e o tempo de tratamento. Observa-se que o aumento da temperatura proporciona redução da reflectância dos painéis para todo o espectro analisado. Fica evidente também que a reflectância é maior nos espectros de maior comprimento de onda.

O tempo do tratamento também reduziu a reflectância, e a diferença é mais acentuada entre 12 e 16 minutos, enquanto que o prolongamento do tratamento até 20 minutos, não acentua grandemente desta diferença. A redução da reflectância está em função do escurecimento da superfície do painel indicando que o painel absorve mais e reflete menos a luz. Esta redução da reflectância frente ao tratamento térmico foi evidenciada também por MITCHELL (1988) e TROUGHTON e CHOW (1973), bem como por LOUSTARINEN e LOUSTARINEN (2001) para madeira seca mesmo por meio da secagem convencional.

GRÁFICO 20 - REFLECTÂNCIA DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA E O TEMPO DE TRATAMENTO.



4.3.4 Efeito nas Propriedades Químicas

A Tabela 38 apresenta a média e o coeficiente de variação para os principais componentes químicos básicos dos painéis. Os principais açúcares identificados foram a glicose, oriundo da celulose; xilose, galactose, arabinose e manose, que compõem as hemiceluloses. Observa-se que existe uma tendência de redução da galactose, arabinose e manose, à medida que aumenta a temperatura e o tempo de tratamento. Essa redução implica em redução no conteúdo total das hemiceluloses, aumentando assim a proporção da glicose. A lignina, por outro lado, não é alterada.

TABELA 38 - MÉDIA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS COMPONENTES QUÍMICOS.

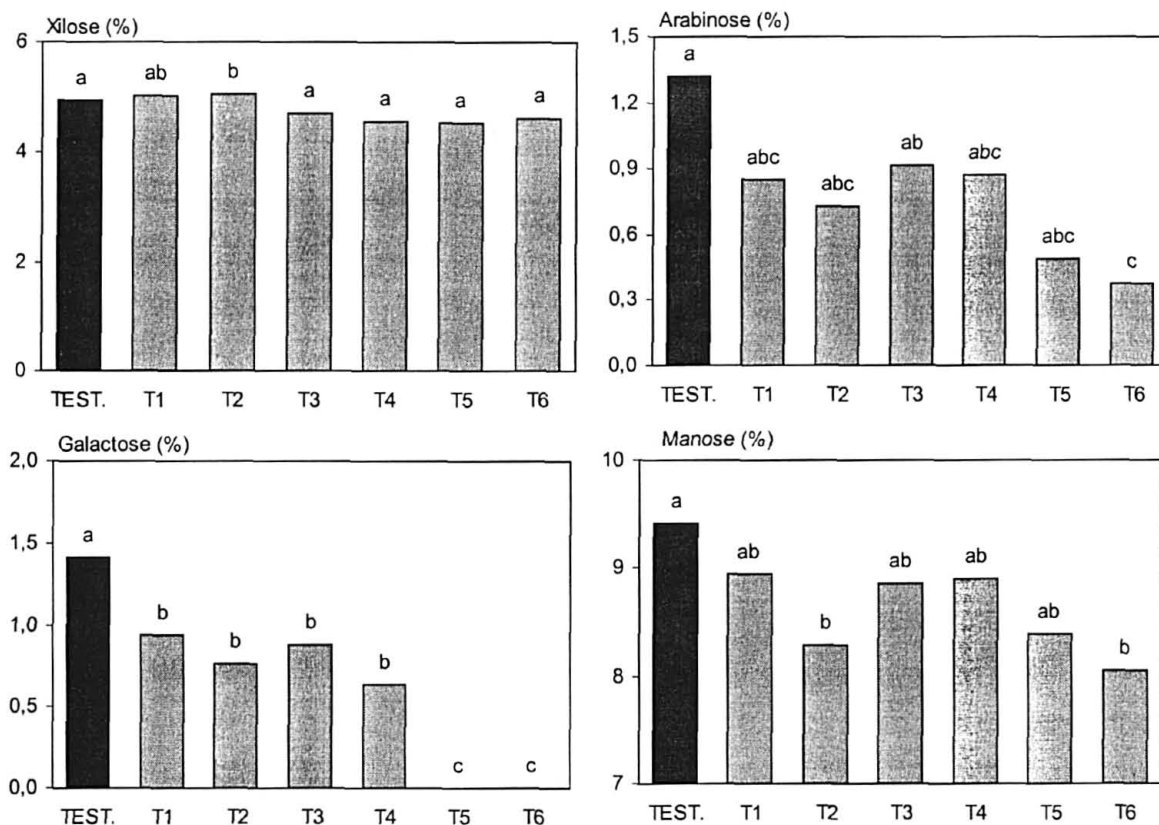
COMPONENTES	TRATAMENTOS						
	TEST.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Glicose (%)	37,99 (0,2)	38,38 (0,5)	38,27 (1,0)	38,08 (0,6)	38,39 (0,7)	39,45 (1,2)	39,90 (0,3)
Xilose (%)	4,93 (2,9)	5,03 (1,1)	5,05 (3,0)	4,70 (6,2)	4,56 (5,7)	4,53 (2,7)	4,62 (7,9)
Galactose (%)	1,41 (11,5)	0,93 (6,7)	0,77 (28,1)	0,88 (14,1)	0,64 (35,0)	0,00 (0,0)	0,00 (0,0)
Arabinose (%)	1,32 (14,2)	0,85 (14,4)	0,73 (43,6)	0,92 (23,5)	0,87 (33,2)	0,49 (37,6)	0,38 (41,6)
Manose (%)	9,42 (4,2)	8,95 (4,0)	8,28 (8,1)	8,85 (4,1)	8,90 (6,4)	8,39 (7,6)	8,07 (1,0)
Hemicelulose (%) ⁽¹⁾	17,09 (4,9)	15,77 (3,5)	14,83 (9,0)	15,35 (6,2)	14,96 (8,6)	13,42 (6,9)	13,06 (3,7)
Lignina (%)	32,62 (0,3)	32,03 (1,9)	32,19 (0,1)	34,64 (6,7)	32,30 (0,1)	32,52 (0,3)	32,72 (1,0)
Ligninasol (%)	0,59 (4,1)	0,54 (2,2)	0,55 (9,1)	0,54 (0,5)	0,51 (6,8)	0,50 (8,7)	0,46 (9,6)

NOTAS: (1) Xilose + galactose + arabinose + manose
Coeficiente de variação (%) entre parênteses.

De fato, a análise estatística identificou diferenças significativas para a proporção dos açúcares dos painéis (Anexo 2, Tabela 11). O Gráfico 21 apresenta esses resultados, e como pode ser visto a proporção de arabinose, galactose e manose são reduzidas à medida que se aumenta a temperatura e o tempo do tratamento. O açúcar mais afetado foi a galactose, cujos níveis reduziram-se a 0% à 220°C a partir de 16 minutos de tratamento.

Pelo Gráfico 21 observa-se que a redução da proporção dos açúcares da hemicelulose implicou em redução significativa da quantidade total deste polímero. Deste modo, aumentou a proporção da celulose (analisada como glicose) à medida que se aumentou a temperatura e o tempo do tratamento térmico. Isso ocorre porque a hemicelulose é menos estável frente ao tratamento térmico que a celulose (FENGEL e WEGENER 1989; STAMM, 1964).

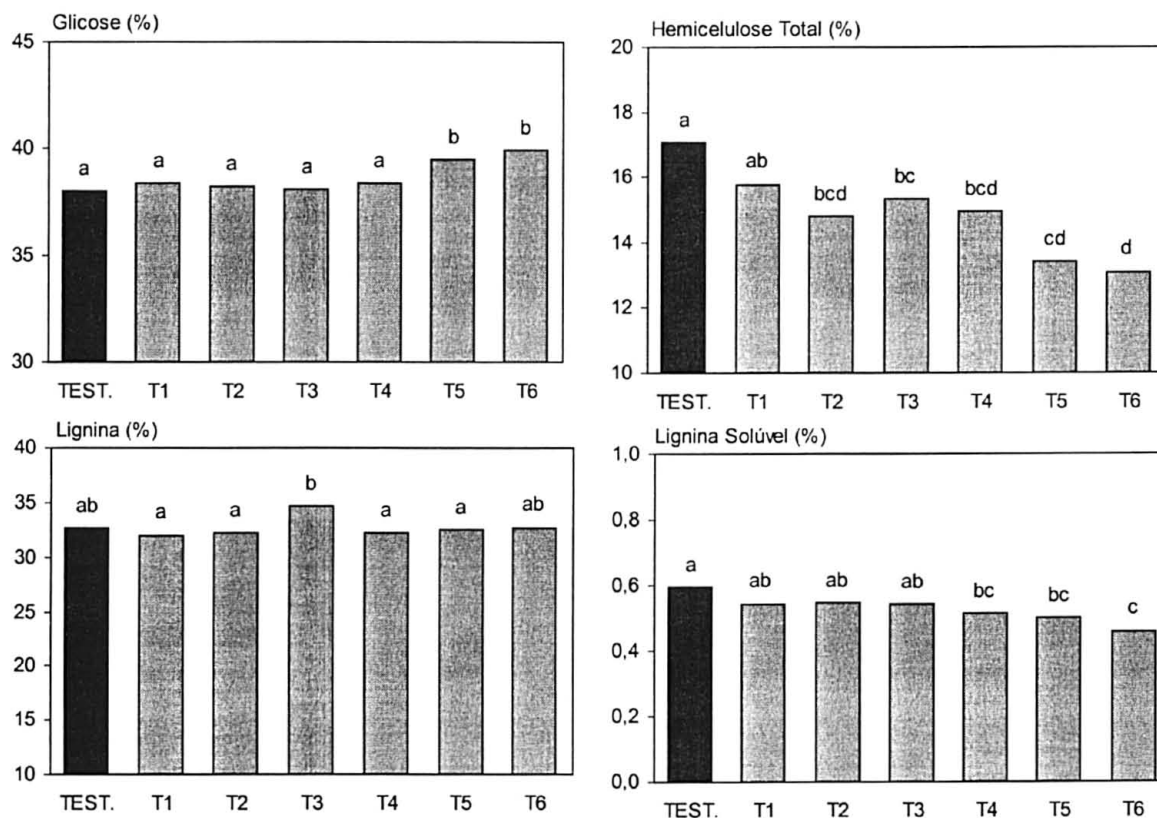
GRÁFICO 21 - COMPARAÇÃO PARA A PROPORÇÃO DE AÇÚCARES DA HEMICELULOSE ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

A degradação das hemiceluloses ocorre já a partir de 150°C, enquanto que para a celulose inicia-se apenas a partir de 230°C. A lignina é o polímero da madeira mais estável frente ao tratamento térmico, e sua degradação inicia-se a partir de 250°C (IPT, 1986; BEALL e EICKENER, 1970). Assim, as condições do tratamento térmico permitiram apenas a degradação das hemiceluloses, enquanto que as proporções de celulose e lignina mantiveram-se relativamente constantes (Gráfico 22). Deve-se ressaltar que a lignina é um composto fenólico, tal o adesivo empregado nas camadas externas do painel, e isso pode ter influenciado no resultado.

GRÁFICO 22 - COMPARAÇÃO PARA OS COMPONENTES QUÍMICOS BÁSICOS ENTRE OS PAINÉIS TRATADOS E A TESTEMUNHA.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

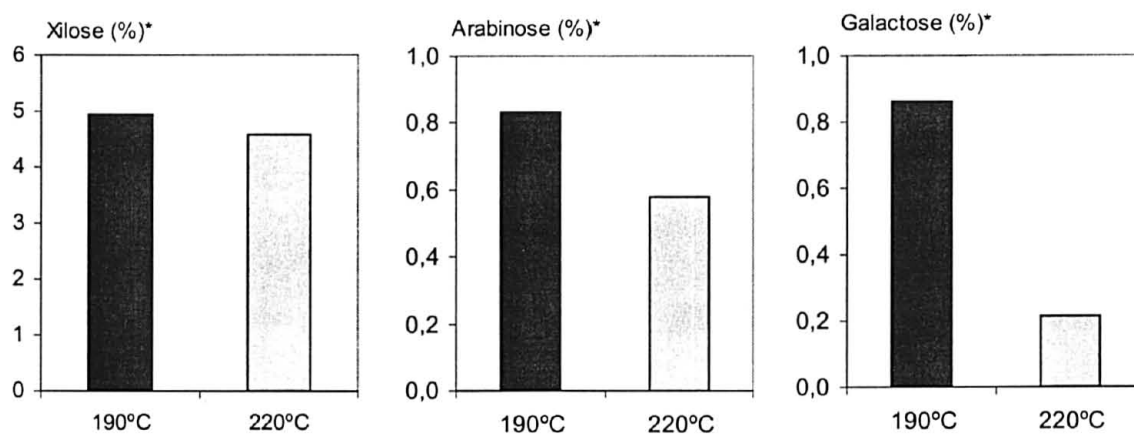
A média e o coeficiente de variação das propriedades químicas dos painéis tratados, afetadas pelo tratamento, de acordo com a temperatura são apresentados na Tabela 39. Evidencia-se a tendência de redução da proporção de todos os açúcares das hemiceluloses e da lignina solúvel, e incremento da proporção de glicose, com o aumento da temperatura.

O Gráfico 23 apresenta o resultado da análise de variância para o efeito da temperatura sobre a proporção dos açúcares da hemicelulose. À exceção da manose, para todos os demais açúcares a análise estatística (Anexo 3, Tabela 17) identificou o efeito da temperatura de tratamento sobre sua proporção. O açúcar mais afetado foi a galactose, cuja proporção foi reduzida em até 75%, quando se aumentou a temperatura de 190°C para 220°C.

TABELA 39 - COMPONENTES QUÍMICOS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM A TEMPERATURA DE TRATAMENTO.

COMPONENTE	190 °C		220 °C	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)
Glicose	38,24	0,70	39,25	1,83
Xilose	4,92	4,87	4,56	5,35
Galactose	0,86	17,65	0,21	23,89
Arabinose	0,83	26,41	0,58	43,76
Manose	8,69	6,10	8,45	6,75
Hemicelulose Total	15,31	6,47	13,81	8,83
Lignina	32,95	5,37	32,51	0,77
Lignina Solúvel	0,54	5,00	0,49	8,97

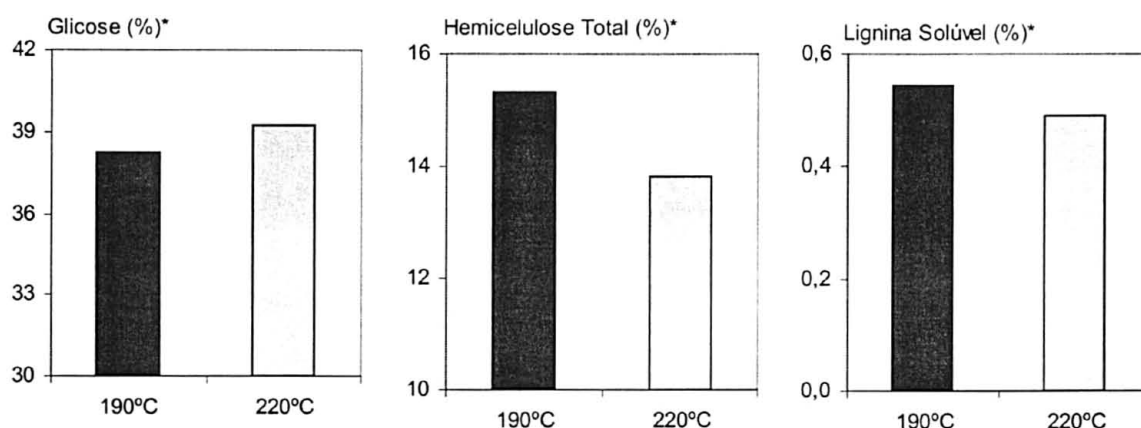
GRÁFICO 23 - EFEITO DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO SOBRE A PROPORÇÃO DOS AÇÚCARES DA HEMICELULOSE.



NOTA: * significativo pela ANOVA ao nível de $\alpha = 0,05$.

O Gráfico 24 apresenta os componentes básicos que foram afetados significativamente pela temperatura de tratamento: glicose, hemicelulose total e lignina solúvel. A lignina não foi afetada pela temperatura do tratamento, e demonstra que é mais resistente que os demais componentes em relação à degradação térmica. A proporção total da hemicelulose é reduzida com o aumento da temperatura de tratamento de 190°C para 220°C, o mesmo sendo observado para a lignina solúvel. Com a redução do teor total de hemicelulose, aumenta a proporção da celulose (analisada como glicose).

GRÁFICO 24 - EFEITO DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO SOBRE A PROPORÇÃO DOS COMPONENTES BÁSICOS DA MADEIRA.



NOTA: * significativo pela ANOVA ao nível de $\alpha = 0,05$.

As médias e os coeficientes de variação para a proporção dos componentes químicos dos painéis tratados de acordo com o tempo de tratamento são apresentados na Tabela 40. O comportamento dos componentes em relação ao tempo não é muito claro, mas pode-se identificar que aumentando o tempo de tratamento de 12 para 16 minutos, ocorre redução acentuada na proporção de galactose e arabinose, e quando se prolonga o tratamento até 20 minutos estas proporções voltam a aumentar.

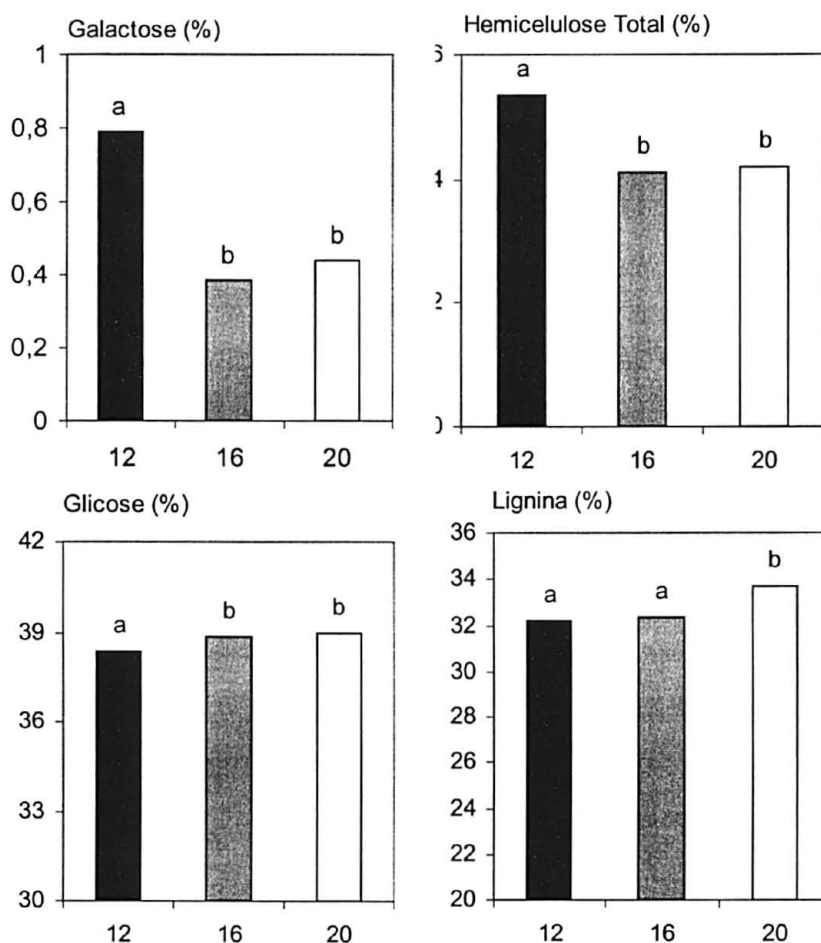
TABELA 40 - COMPONENTES QUÍMICOS DOS PAINÉIS TRATADOS DE ACORDO COM O TEMPO DE TRATAMENTO.

COMPONENTE	12 min		16 min		20 min	
	μ	CV (%)	μ	CV (%)	μ	CV (%)
Glicose	38,38	0,50	38,86	1,90	38,99	2,53
Xilose	4,79	6,39	4,79	6,26	4,65	6,48
Galactose	0,78	27,66	0,38	43,71	0,43	37,16
Arabinose	0,86	23,81	0,61	43,53	0,64	46,71
Manose	8,93	4,94	8,33	7,23	8,45	5,73
Hemicelulose Total	15,36	6,58	14,12	9,21	14,20	1,41
Lignina	32,16	1,31	32,35	0,59	33,67	5,49
Lignina Solúvel	0,53	5,58	0,52	9,62	0,50	10,60

Os demais açúcares da hemicelulose (xilose e manose) apresentam esse mesmo tipo de comportamento, mas de modo bem menos acentuado. Por outro lado, glicose e lignina têm uma tendência de aumentar suas proporções à medida que se aumenta o tempo de tratamento.

A análise estatística (Anexo 3, Tabela 17) identificou que o tempo de tratamento teve efeito apenas sobre a galactose, a hemicelulose total, a glicose e lignina. Para a galactose, o efeito do tempo é muito mais significativo, e é possível identificar redução acentuada de sua proporção com o aumento do tempo de tratamento de 12 para 16 minutos. Trata-se, portanto, de um açúcar altamente sensível ao tempo do tratamento, e também à temperatura, como pode ser visto no Gráfico 25.

GRÁFICO 25 - EFEITO DO TEMPO DE TRATAMENTO NA PROPORÇÃO DOS COMPONENTES QUÍMICOS.



NOTA: Letras distintas indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de $\alpha = 0,05$.

A proporção da glicose é aumentada quando se passa de 12 para 16 minutos, mantendo-se constante até 20 minutos. Como explicado, a redução da hemicelulose, significa aumento na proporção de glicose; como a hemicelulose total foi influenciada pelo tempo, supõe-se que o aumento da glicose esteja relacionado principalmente à degradação da galactose. Em última análise, as alterações das propriedades de madeira tratada termicamente estão relacionadas à alterações em quantidade e qualidade dos seus compostos químicos como pode ser observado na literatura (ZAMAN et al., 2000; ROWELL e YOUNGS, 1981).

Deste modo, foi feita uma análise da correlação entre a proporção dos componentes químicos e aquelas propriedades mecânicas, físicas e colorimétricas que foram afetadas pelo tratamento térmico. Os resultados são apresentados na Tabela 41. Para as propriedades mecânicas observa-se a existência de uma relação diretamente proporcional à quantidade total de hemicelulose, ou seja, quanto maior o conteúdo deste polímero mais resistente são os painéis. Por outro lado, esta relação é inversa com o conteúdo de celulose. De fato, isso já era esperado, já que a degradação da hemicelulose, ocasionou o aumento proporcional da celulose, uma vez que as condições do tratamento não foram suficientes para promover a sua degradação. O açúcar da hemicelulose que melhor explica a variação das propriedades mecânicas é a galactose. Como a proporção da lignina não foi afetada pelo tratamento, evidentemente esse componente químico não pode explicar quaisquer variações nas propriedades estudadas, e isto pode ser observado pelos dados da Tabela 41. CURLING et al. (2001) e CHRISTIANSEN (1997) também observaram relação entre a degradação das hemiceluloses e as propriedades de resistência da madeira tratada termicamente.

TABELA 41 - CORRELAÇÕES DE PEARSON (R) ENTRE OS COMPONENTES QUÍMICOS E AS PROPRIEDADES AFETADAS PELO TRATAMENTO.

PROPRIEDADE	COMPONENTES QUÍMICOS ⁽¹⁾							
	GLI	XIL	GAL	ARA	MAN	HCEL	LIG	LIGSOL
Mecânicas								
MOR//	-0,899**	0,669	0,893**	0,860*	0,671	0,864*	-0,005	0,964**
MOR⊥	-0,610	0,854*	0,628	0,476	0,433	0,628	-0,336	0,709*
FM//	-0,860*	0,748*	0,856*	0,781*	0,565	0,809*	0,048	0,953**
Físicas								
IE2H	-0,869*	0,750	0,965**	0,909**	0,750	0,942**	0,066	0,976**
ABS2H	-0,954**	0,597	0,909**	0,858*	0,659	0,854*	0,262	0,908**
IE24H	-0,885**	0,733	0,975**	0,933**	0,801*	0,966**	0,015	0,982**
ABS24H	-0,885**	0,733	0,975**	0,933**	0,801*	0,966**	0,015	0,982**
TUE	-0,840*	0,674	0,952**	0,944**	0,865*	0,972**	-0,088	0,962**
PMAT	0,835*	-0,815*	-0,860*	-0,747	-0,560	-0,861*	0,165	-0,942**
PDMAT	0,930**	-0,761	-0,956**	-0,868*	-0,662	-0,948**	-0,004	-0,960**
Colorimétricas								
L	-0,866**	0,872*	0,941**	0,822**	0,678	0,909**	0,003	0,923**
h	-0,805*	0,825*	0,949**	0,855**	0,729	0,929**	0,035	0,918**
a*	0,046	-0,192	-0,386	-0,497	-0,548	-0,474	0,214	-0,399
b*	-0,879**	0,853*	0,910**	0,759*	0,601	0,854*	0,128	0,876**
C	-0,884**	0,845*	0,888**	0,729*	0,565	0,825*	0,145	0,854*
ΔE	0,759*	-0,941**	-0,865**	-0,647	-0,384	-0,809*	0,051	-0,857*
ΔC	0,778**	-0,886*	-0,895**	-0,689	-0,434	-0,835*	-0,109	-0,840*

NOTAS: (1) GLI: glicose; XIL: xilose; ARA: arabinose; MAN: manose; HCEL: hemicelulose total; LIG: lignina; e LIGSOL: lignina solúvel.

*, ** significativo ao nível de $\alpha = 0,05$ e $0,01$.

As propriedades físicas relativas à estabilidade dimensional (IE, ABS e TUE) estão altamente correlacionadas com todos os compostos químicos, exceto a lignina. Observa-se que existe uma relação inversa entre estas propriedades e a celulose (glicose) e uma relação direta com a hemicelulose. Assim, quanto maior a quantidade de hemicelulose, menos estáveis são os painéis.

A hemicelulose é o polímero mais higroscópico da madeira (ROWELL e YOUNGS, 1981; SKAAR, 1988; STAMM, 1964) e, portanto, a sua degradação implica em redução na capacidade de adsorção de moléculas de água, diminuindo

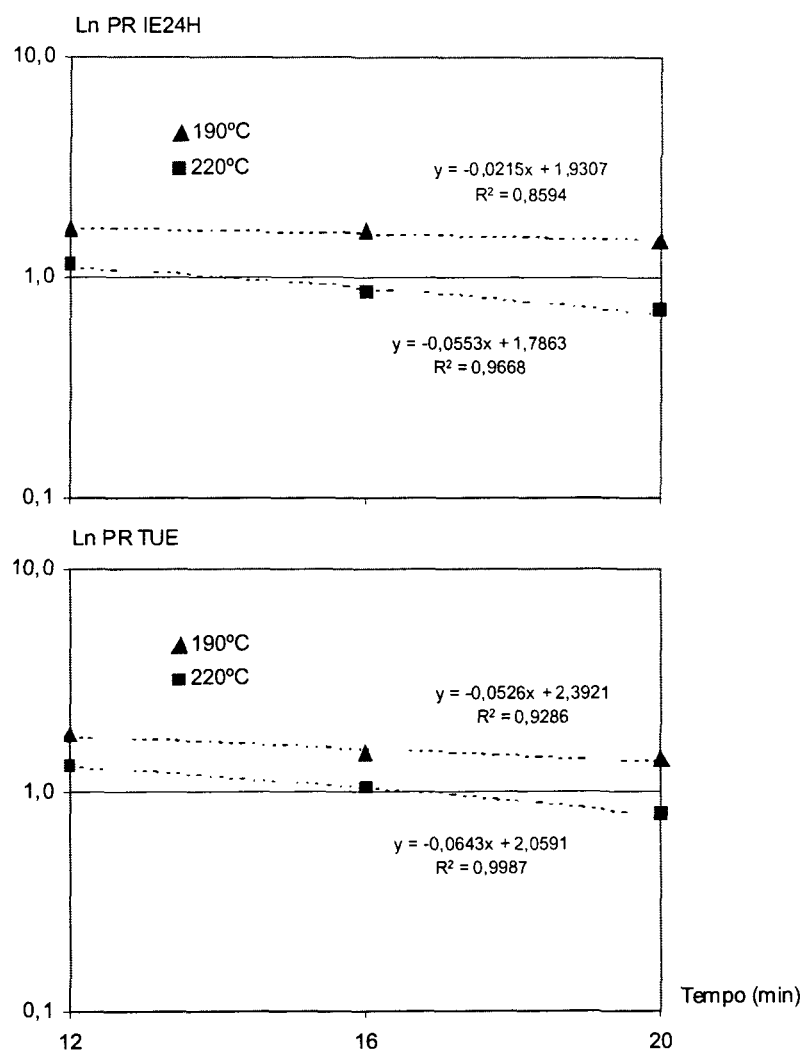
TUE. Pela Tabela 41 observa-se que a redução da hemicelulose total (HCEL) explica até 97% da variação de TUE, o que está de acordo com explicado anteriormente. O principal açúcar da hemicelulose que explica a queda de TUE é a galactose, e este é o açúcar que mais afetou a perda de massa dos painéis (PMAT e PDMAT). Assim, quanto maior PMAT e PDMAT menor é a proporção da galactose, indicando ser o açúcar que mais contribui para a perda de massa do painel.

4.3.5 Parâmetros Cinéticos da Degradação Térmica

Nos itens anteriores foi estudado o efeito do tempo de tratamento. Observou-se que apenas para sete propriedades (IE24H, TUE, PMAT, PDMAT, L, galactose e hemicelulose) foi possível identificar o efeito do tempo de tratamento, ou seja, seus valores são negativamente afetados pelo aumento do tempo. Em outras palavras, a taxa de degradação térmica (k) é influenciada pelo tempo. A taxa de alteração dessas propriedades está de acordo com a equação de Arrhenius, e assim o logaritmo de seu valor residual ($\ln PR$) é diretamente proporcional ao tempo de tratamento térmico.

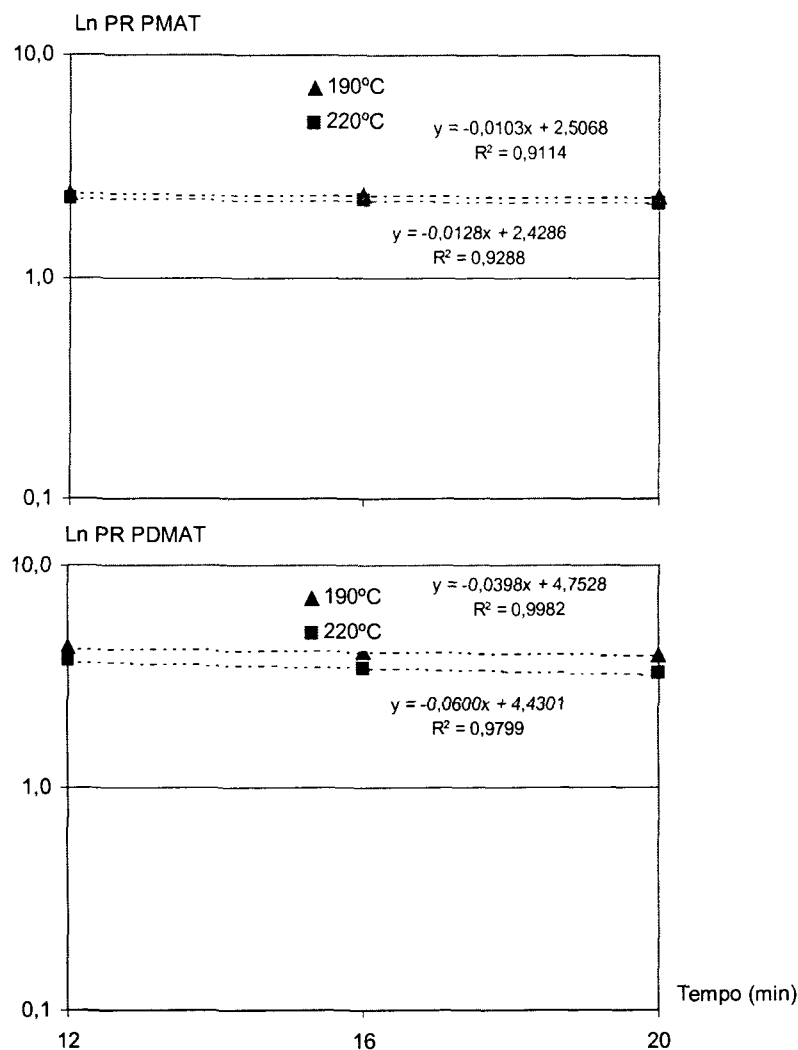
O Gráfico 26 apresenta a relação entre $\ln PR$ e tempo para as propriedades físicas IE24H e TUE, relacionadas à estabilidade dimensional. Evidencia-se, de fato, a existência desta relação linear, altamente significativa (R^2 elevado), com equação do tipo $y = a + bx$, onde então b é a taxa de degradação térmica média (k) da propriedade, e x é o tempo em minutos.

GRÁFICO 26 - TAXA DE DEGRAÇÃO TÉRMICA (K) DAS PROPRIEDADES IE24H E TUE.



O sinal negativo indica que a propriedade tem seus valores reduzidos com aumento no tempo de tratamento. Observa-se também que quanto maior a temperatura, maior são os valores de k, indicando que em temperatura mais elevada a taxa de degradação térmica é influenciada pelo tempo. Como visto anteriormente, IE24 e TUE, foram altamente influenciadas pela temperatura e pelo tempo do tratamento. O Gráfico 27 apresenta k para as propriedades PMAT e PDMAT. Da mesma forma, evidencia-se a relação linear entre Ln PR e o tempo de tratamento. No entanto, a inclinação das retas é inferior à inclinação observada no Gráfico 26.

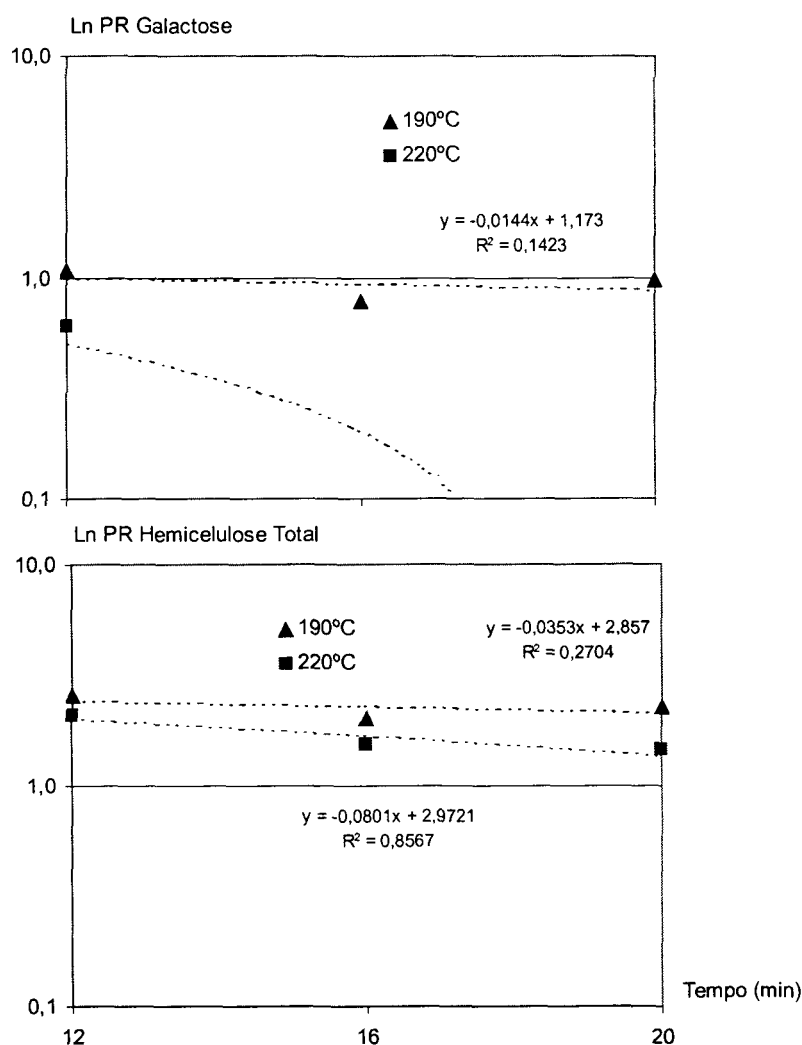
GRÁFICO 27 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) DAS PROPRIEDADES PMAT E PDMAT.



Isso indica que a taxa de degradação térmica dessas propriedades é menor que a da IE24 e TUE. A taxa para PMAT é ligeiramente inferior à de PDMAT, mas para PDMAT aparentemente a temperatura tem maior efeito, haja vista a maior distância entre as retas de 190°C e 220°C. O PDMAT é perda definitiva de massa do painel, e indica qual a diferença entre a massa inicial, antes do tratamento, e massa final, após tratamento e climatização dos painéis. Assim, supõe-se que menor PDMAT esteja em função da degradação dos constituintes químicos, principalmente galactose, e do menor TUE.

O Gráfico 28 apresenta k para os componentes químicos afetados pelo tempo de tratamento. Observa-se que para a galactose à temperatura 190°C existe relação linear, ou seja, está de acordo com a equação de Arrhenius. No entanto, para 220°C esta relação não é linear, sendo mais apropriadamente definida por uma relação exponencial.

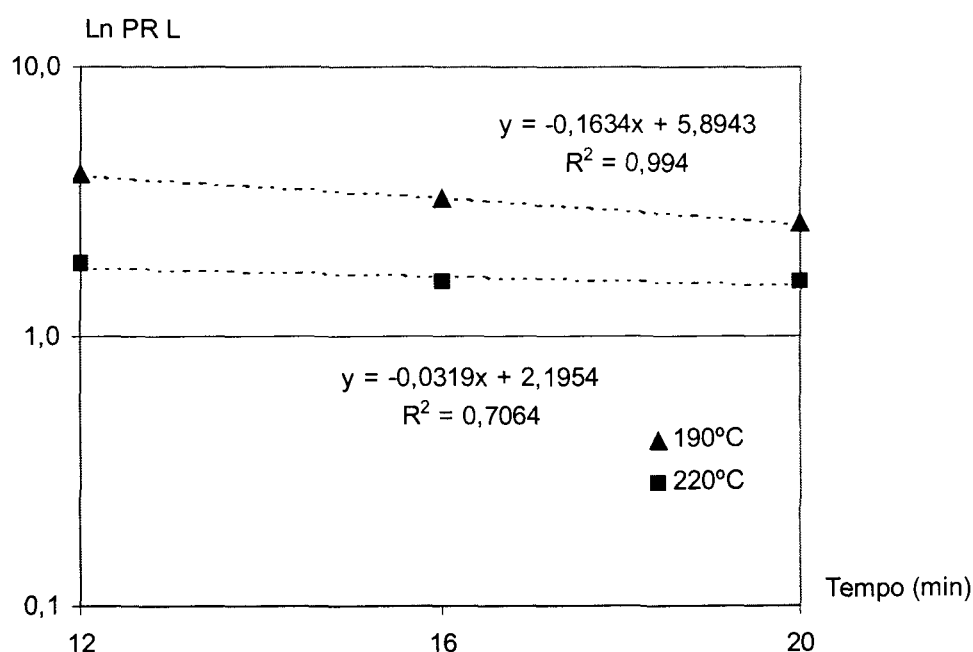
GRÁFICO 28 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) DOS COMPONENTES GALACTOSE E HEMICELULOSE.



MITCHELL (1988) apresenta uma equação para a determinação de k para propriedades que não são afetadas segundo a equação de Arrhenius. O autor observou também que o logaritmo do MOR residual de *Pinus taeda* apresenta relação exponencial com o tempo de tratamento. Empregando-se esta equação para

determinar a taxa de degradação térmica da galactose à 220°C, foi obtido um valor de 0,491 moles/min. Por último, o Gráfico 29 apresenta a taxa de degradação térmica da claridade do painel (L), uma das propriedades colorimétricas. Aparentemente, os resultados obtidos são inconsistentes, uma vez k foi mais acentuada à 190°C que à 220°C. Esse resultado é discrepante do encontrado para as demais propriedades.

GRÁFICO 29 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) DA CLARIDADE (L).



Com a determinação de k foi possível determinar a energia de ativação (ΔH) para a reação degradativa de cada uma das propriedades. A Tabela 42 apresenta o k e ΔH para as propriedades influenciadas pelo tempo do tratamento térmico. A primeira constatação que se tem é que de fato, quanto maior a temperatura maior é k , exceto para L.

TABELA 42 - TAXA DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA (K) E ENERGIA DE ATIVAÇÃO (ΔH) PARA AS PROPRIEDADES AFETADAS PELO TEMPO DE TRATAMENTO.

PROPRIEDADE	k (moles/min.)		ΔH (cal/moles)	
	190°C	220°C	190°C	220°C
IE24H	0,0215	0,0526	3.532	2.884
TUE	0,0522	0,0643	2.715	2.688
PMAT	0,0103	0,0128	4.210	4.269
PDMAT	0,0398	0,0600	2.966	2.756
L	0,1634	0,0319	1.667	3.375
Galactose	0,0144	0,4910	3.901	697
Hemicelulose Total	0,0353	0,0801	3.076	2.473

A propriedade menos afetada foi PMAT, em ambas as temperaturas, seguido de galactose, à 190°C. Por outro lado, a propriedade mais sensível foi a galactose à 220°C, cujo k foi maior entre todas as avaliadas, seguida por TUE e PDMAT. Os valores para energia de ativação (ΔH), que é a quantidade de energia necessária para iniciar as alterações (degradação), são menores para aquelas propriedades mais sensíveis à degradação térmica (maior k).

Evidencia-se que ΔH a é menor quanto maior é a temperatura. Isto ocorre por que a uma maior temperatura, determinada propriedade resiste menos à degradação térmica, enquanto que frente à temperatura mais baixas é necessário uma quantidade maior de energia para provocar a degradação térmica. Estes resultados estão de acordo com os observados para as propriedades mecânicas e físicas.

Por outro lado, os valores de ΔH calculados estão abaixo dos valores usualmente encontrados, que variam de 10000 a 50000 cal/moles, segundo STAMM (1964). Supõe-se que esta diferença seja em função de que os dados apresentados por este autor são relativos a experimentos desenvolvidos em condições distintas das utilizada no presente trabalho.

4.3.6 Escolha da Temperatura e do Tempo de Tratamento Térmico

Nos itens 4.3.1 a 4.3.4 foram analisados o efeito da temperatura e do tempo de tratamento sobre as propriedades dos painéis tratados, e a Tabela 43 apresenta um resumo dos resultados apresentados nesses itens.

TABELA 43 - EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE TRATAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES.

PROPRIEDADE	TEMPERATURA (°C)			TEMPO (MIN.)			
	TENDÊNCIA ⁽¹⁾	190°C	220°C	TENDÊNCIA	12	16	20
Físicas							
IE2H (%)	↓	a	b	↔	a	a	a
ABS2H (%)	↓	a	b	↔	a	a	a
IE24H (%)	↓	a	b	↓	a	b	c
ABS24H (%)	↓	a	b	↔	a	a	a
TUE (%)	↓	a	b	↓	a	b	b
PMAT (%)	↑	a	b	↑	a	a	b
PDMAT (%)	↑	a	b	↑	a	a	b
ME _{TRAT}	↔	a	a	↔	a	a	a
Mecânicas							
MOR// (MPa)	↓	a	b	↔	a	a	a
FM// (N)	↓	a	b	↔	a	a	a
MOR⊥ (MPa)	↓	a	b	↔	a	a	a
FM⊥ (N)	↓	a	b	↔	a	a	a
Colorimétricas							
L	↓	a	b	↓	a	ab	b
b*	↓	a	b	↔	a	a	a
C	↓	a	b	↔	a	a	a
h	↓	a	b	↔	a	a	a
ΔE*	↑	a	b	↔	a	a	a
ΔC*	↑	a	b	↔	a	a	a
Químicas							
Glicose	↑	a	b	↑	a	b	b
Xilose	↓	a	b	↔	a	a	a
Galactose	↓	a	b	↓	a	b	b
Arabinose	↓	a	b	↔	a	a	a
Hemicelulose Total	↓	a	b	↔	a	a	b
Lignina	↔	a	a	↓	a	a	b
Lignina Solúvel	↓	a	b	↔	a	a	a

NOTA: (1) Tendência de acréscimo (↑), decréscimo (↓) ou sem tendência (↔) na propriedade quando se aumenta a temperatura ou o tempo de tratamento. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa.

O objetivo desse agrupamento foi o de permitir e facilitar uma análise mais ampla desses resultados, para que se possa definir mais claramente qual deve ser a temperatura e o tempo empregados, de tal modo que afete menos as propriedades mecânicas e colorimétricas, e implique em melhoria da estabilidade dimensional.

Observa-se por esta Tabela que todas as propriedades avaliadas, exceto ME_{TRAT} e lignina são afetadas pela temperatura do tratamento. Assim, a utilização de temperatura de 220°C implica em redução dos valores das propriedades de resistência, mas significa melhoria na estabilidade dimensional e alteração na cor dos painéis tratados. Por outro lado, o tempo do tratamento térmico, afeta poucas propriedades, principalmente as físicas e as químicas, nenhuma de resistência mecânica e apenas uma colorimétrica.

A principal implicação prática está relacionada ao fato de que para as propriedades de resistência, as alterações provocadas pelo tratamento em 12 minutos, são estatisticamente idênticas àsquelas provocadas em maior tempo, mas, no entanto, o prolongamento do tratamento melhora as principais propriedades de estabilidade dimensional: IE24H e TUE. Por outro lado, o prolongamento do tratamento, produz alteração da claridade do painel, escurecendo sua superfície.

Analisando-se os seis tratamentos propostos tem-se que a utilização de 190°C seria vantajosa principalmente para as propriedades mecânicas, enquanto que a temperatura de 220°C seria melhor para a melhoria da estabilidade dimensional. Como IE24H é afetada pelo tempo, na hipótese de escolha da temperatura de 190°C para o tratamento térmico, seria recomendado, que o tratamento fosse prolongado, ou seja, com duração de 20 minutos. Nessa situação o tempo seria o principal fator para melhoria da estabilidade dimensional.

Na escolha de 220°C, a opção seria o menor tempo: 12 minutos; isso porque o ganho de estabilidade dimensional seria proporcionado pelo aumento da temperatura de tratamento, e então o tempo de tratamento poderia ser de menor duração. Assim, tem-se então duas opções: menor temperatura e maior tempo; e

maior temperatura e menor tempo, que são as condições dos tratamentos T3 (190°C, 20 min.) e T4 (220°C, 12 min.) respectivamente.

Comparando-se os valores obtidos entre o painel testemunha e T3/T4, não há diferenças estatisticamente significativas nas propriedades mecânicas, mas há diferenças significativas para as principais propriedades de estabilidade dimensional (IE2H, IE24H e TUE). Especificamente para o T3 tem-se, também, que não há alteração significativa da cor do painel (L, a*, b* e C) em comparação com a testemunha, mas também não há para a absorção de água (ABS2H e ABS24H). Para T4 ocorre o inverso, melhoria com relação à absorção (ABS2H e ABS24H) e *alteração significativa da cor* (L, a*, b*, C e h).

Sendo assim, na escolha de um tratamento, do ponto de vista técnico, deve-se levar em consideração essas alterações, analisando-as à luz da utilização final do produto. Para finalidades cuja aparência seja importante deve-se dar preferência a T3, enquanto que para finalidades onde a resistência à absorção de água seja fundamental, deve-se escolher T4.

4.4 COMPARAÇÃO COM PAINÉIS COMPENSADOS

As propriedades de estabilidade dos painéis tratados e também da testemunha foram comparadas com as do painel compensado e os resultados são apresentados na Tabela 44. Os valores de IE2H e IE24H do compensado foram muito inferiores aos observados para os painéis OSB, indicando que mesmo com o tratamento térmico, destes o compensado testado foi mais estável. O tratamento mais severo (T6), que reduziu em até 50% o inchamento dos painéis tratados em comparação à testemunha, apresentou o IE foi quase quatro vezes superior ao observado no compensado. Essas diferenças identificadas entre o compensado e o OSB foram significativas, conforme Anexo 4, Tabela 18.

TABELA 44 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL ENTRE OS PAINÉIS OSB E O COMPENSADO.

TRATAMENTO	PROPRIEDADE (%)				
	IE2H	ABS2H	IE24H	ABS24H	TUE
Compensado	1,60	19,80	2,50	51,60	13,20
T0 (testemunha)	8,91	<u>19,17</u>	18,64	<u>48,76</u>	9,27
T1 (190°C, 12')	6,53	<u>14,60</u>	15,07	40,10	7,73
T2 (190°C, 16')	6,90	<u>17,90</u>	14,98	<u>46,51</u>	7,17
T3 (190°C, 20')	6,51	<u>18,10</u>	14,40	<u>47,34</u>	6,93
T4 (220°C, 12')	5,06	<u>15,04</u>	12,72	39,71	6,73
T5 (220°C, 16')	4,00	10,77	10,71	35,82	5,93
T6 (220°C, 20')	3,56	9,70	9,43	32,25	5,01

NOTA: Valores com sublinhado duplo não diferem estatisticamente dos valores observados para o compensado.

As lâminas que compõem o compensado em seu conjunto têm espessura igual à espessura final do painel e assim a prensagem tem a função apenas de prover o contato interlaminar até se completar a cura da cola. As tensões de compressão são praticamente ausentes. Quando o compensado é colocado em água, o IE ocorre primordialmente em função do inchamento próprio da madeira e não em função da liberação das tensões de compressão.

Diferentemente do compensado, a prensagem para a produção de painéis OSB tem uma importante função adicional: comprimir o colchão de partículas, cuja altura pode ser até 10 vezes superior à espessura final do painel. Há inclusive a fase de pré-prensagem, cujo objetivo é reduzir um pouco a altura do colchão antes da prensagem final.

Assim, o painel é consolidado e uma tensão interna latente permanece, sendo liberada quando o painel é imerso em água, conforme explicado anteriormente. É por esse motivo que o painel compensado testado foi mais estável que os painéis OSB tratados. No entanto, o tratamento T6 conseguiu trazer os valores de ABS para valores por vezes próximos, ou mesmo inferiores, aos observados em compensados, como pode ser visto pela Tabela 44.

Para alguns tratamentos os valores para as propriedades ABS2H e ABS24H dos painéis OSB foram estatisticamente inferiores aos observados no compensado, enquanto que para TUE todos os valores foram estatisticamente inferiores. Para as propriedades de absorção esta redução foi na ordem de 20% a 50%, enquanto que para TUE a redução foi de 30% a 60%. A principal vantagem advinda destes fatos é de que os painéis tratados, ganharão menos massa quando em contato com água líquida ou em vapor, o que é certamente uma vantagem comparativa do ponto de vista do emprego estrutural destes diferentes materiais. Além disso, menor TUE implica em menor quantidade de água disponível para, por exemplo, fungos xilófagos, o que é importante também do ponto de vista estrutural.

Para a propriedade ABS, a baixa massa específica da madeira dos compensados passa a ser uma desvantagem. Isto porque, quanto menor a massa específica, mais porosa é madeira, aumentando a sua capacidade de absorver água nos espaços vazios. Assim a água ocupa os espaços vazios, que são volumosos, aumentando sobremaneira a massa do painel. É por este motivo que o painel compensado absorveu mais água que os painéis tratados.

A Tabela 45 apresenta valores de IE e ABS em 24 horas encontrados na literatura mais recente. Os valores obtidos no presente trabalho para IE24H obtidos para T6 são menores entre os apresentados para painéis OSB, mas ligeiramente superiores aos observados para compensados.

TABELA 45 - INCHAMENTO EM ESPESSURA E ABSORÇÃO DE ÁGUA EM 24 HORAS OBSERVADO NA LITERATURA.

MATERIAL	IE (%)	ABS (%)	FONTE
OSB			
T6 (220°C, 20 min)	9,4	32,3	Este estudo
<i>Eucalyptus grandis</i> (6% resina, 1% parafina)	11,2	20,5	IWAKIRI et al. (2003)
T4 (220°C, 12 min)	12,7	39,9	Este estudo
T3 (190°C, 20 min)	14,4	47,4	Este estudo
<i>Pinus taeda</i> (250°C, 10 min)	14,7	43,5	DEL MENEZZI (2001)
<i>P. oocarpa</i> (6% resina, 1% parafina)	18,2	21,3	MENDES (2001)
<i>E. grandis</i> (10% resina)	18,5	30,9	GOUVEIA (2000)
T0 (testemunha)	18,7	48,7	Este estudo
<i>P. taeda</i> (6% resina, 1%parafina)	21,8	22,6	MENDES (2001)
<i>E. urophylla</i> (10% resina)	27,7	44,1	GOUVEIA (2000)
<i>P. taeda</i> (8% resina)	30,9	45,1	SOUZA et al. (1999)
<i>E. grandis</i> (8% resina)	33,6	66,1	SOUZA et al. (1999)
Compensado			
Tropical (resistente à água)	2,5	51,6	Este estudo
<i>P. oocarpa</i>	5,2	-	IWAKIRI et al. (2003)
<i>P. taeda</i>	7,1	-	IWAKIR et al. (2003)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	8,1	40,9	ALEMIDA (2002)
<i>E. grandis</i> (LVL, madeira 20 anos)	10,9	12,0	PIO (2002)
<i>E. scabra</i>	11,1	-	PIO (1996)

4.5 ASPECTOS OPERACIONAIS E ECONÔMICOS DO TRATAMENTO.

No item 4.3.6 foram recomendados os tratamentos T3 (190°C, 12 min.) e T4 (220°C, 20 min.) tendo em vista os resultados obtidos para propriedades dos painéis tratados. Assim, para esses dois tratamentos foram feitas as análises operacional e econômica.

4.5.1 Operacionalização do Tratamento

O tratamento térmico poderia ser aplicado de duas formas distintas: logo após a consolidação do painel, ou seja, em seguida à prensagem, utilizando-se a

mesma prensa de consolidação; ou em etapa posterior, após o resfriamento, em prensa distinta. Na primeira hipótese, com a utilização de prensas descontínuas (de pratos), o tempo do tratamento seria acrescido ao tempo do ciclo de prensagem do painel. Admitindo-se ciclos de prensagem de 3 a 4 minutos, o novo ciclo de prensagem saltaria para 24 (T3) ou 16 (T4) minutos. Assim, após o ciclo normal de prensagem e consolidação do painel, seria retirada a pressão até o ponto em que se tivesse apenas o contato entre os pratos da prensa e o painel. A partir desse ponto seria aplicado o tratamento térmico de acordo com o tempo definido.

A utilização da mesma prensa de consolidação para o tratamento térmico implicaria em algumas vantagens. A principal delas é que o painel não perderia calor e assim, o tempo do tratamento térmico poderia até mesmo ser reduzido. No presente trabalho, a temperatura inicial do painel foi de 24°C e uma temperatura mais elevada implicaria em um menor tempo para se alcançar a temperatura de equilíbrio (190°C ou 220°C). Além dessa vantagem, o emprego da mesma prensa significaria um menor investimento inicial com relação a equipamentos, instalações e mão de obra. Isso pode significar a viabilidade econômica do tratamento.

Entretanto, a utilização dessa tática apresenta algumas desvantagens. A principal é o aumento significativo do tempo de prensagem, o que demandaria uma completa reorganização do fluxo operacional pré-prensa: secagem de partículas, aplicação de adesivo e formação de colchão. Em um primeiro momento implicaria numa redução da produção até que todo o fluxo estivesse regularizado. Outro aspecto é que nem todos os painéis produzidos deverão ser tratados, estando o tratamento limitado apenas às encomendas destinadas a aplicações externas que demandam estabilidade dimensional. A alteração freqüente do tempo de prensagem para atender essas encomendas implicaria em dificuldades operacionais evidentes.

Outra questão bastante importante é que na atualidade a opção por prensas contínuas para a produção de painéis OSB tem sido crescente. Nesse tipo de prensa a consolidação do painel se completa na etapa final de saída da prensa.

Assim, não seria possível tratar os painéis produzidos, uma vez que prejudicaria a produção dos painéis ainda em fase de consolidação. O tratamento térmico proposto não pode ser empregado em prensas contínuas.

Após a produção do painel e saída da prensa, as reações de polimerização do adesivo podem continuar, naquelas moléculas que não reagiram completamente, e assim o painel está consolidado, mas não na plenitude. Desse modo, não se sabe exatamente se as tensões internas podem ser liberadas nessas condições. Entretanto, OHLMEYER e KRUSE (1999) demonstraram que o empilhamento de painéis ainda quentes, ou seja, ainda não totalmente consolidados, pode reduzir o seu IE. Por outro lado, o presente trabalho avaliou a eficiência do tratamento térmico para painéis OSB já consolidados e resfriados. Seria necessário analisar a eficiência nessa outra condição.

O emprego de uma prensa específica para o tratamento, distinta daquela empregada na consolidação também apresenta vantagens e desvantagens. A principal vantagem seria a manutenção do ciclo de prensagem, o que não implicaria em complicações relativas ao fluxo de produção como abordado acima. Além disso, uma prensa específica permitiria tratar apenas os painéis destinados ao uso exterior.

Entretanto, o envio dos painéis para o tratamento implicaria numa maior perda de calor, determinando o aumento do tempo de tratamento e consequentemente dos custos o que pode significar a inviabilidade econômica do tratamento. A utilização dessa tática pode implicar em altos investimentos com relação a equipamentos e estrutura física da fábrica (item será abordado a frente). Embora a prensa para o tratamento é mais simples que a empregada para a consolidação do painel ainda assim os investimentos podem ser relativamente elevados.

Analisando os prós e contras de ambas as táticas pode-se concluir que a mais indicada é utilização de uma prensa específica para o tratamento. Essa tática causaria menos transtornos iniciais, é mais flexível operacionalmente e também mais produtiva. A Tabela 46 sumariza as vantagens e desvantagens de ambas as táticas.

TABELA 46 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TÁTICAS ANALISADAS.

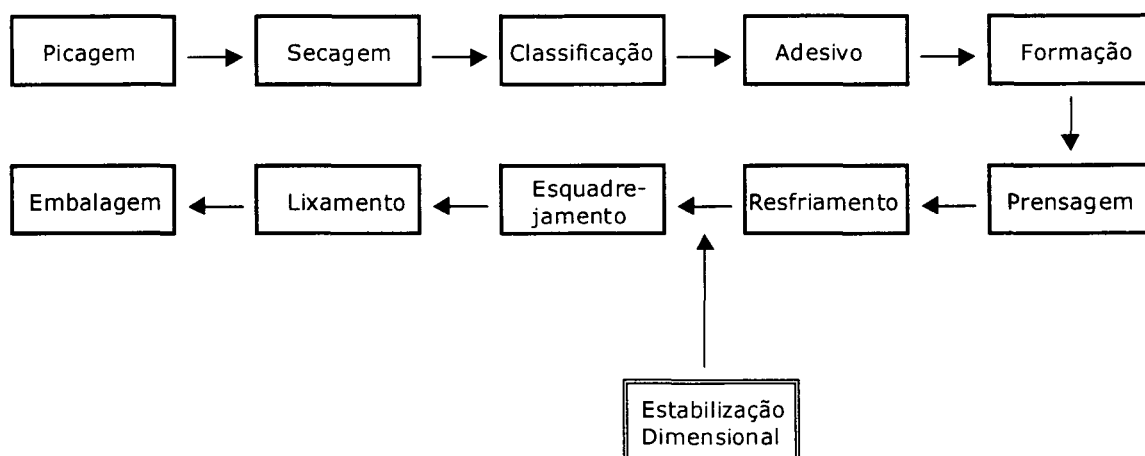
CARACTERÍSTICAS	TÁTICA	
	1 ^a	2 ^b
Produtividade	-	✓
Investimento inicial	✓	-
Operacionalidade	-	✓
Flexibilidade	-	✓
Custo do tratamento	✓	-

NOTAS: a. utilização da mesma prensa de consolidação do painel;

b. utilização de prensa distinta à empregada na consolidação do painel

Como nem toda a produção será tratada, os painéis a serem tratados serão retirados do estoque e serão transportados para a área onde será aplicado o tratamento térmico. Isto significa a introdução de uma etapa no processo produtivo, a de estabilização dimensional, que não necessitaria ser contínua. O tratamento térmico seria feito logo após o resfriamento dos painéis, como ilustrado na Figura 34.

FIGURA 33 - ESQUEMA DE PRODUÇÃO DE PAINÉIS OSB COM INCLUSÃO DA ETAPA DE ESTABILIZAÇÃO.



Assim, é necessária a construção de uma área específica para esta finalidade, cuja dimensão estimada foi de 30 m² para cada prensa requerida para o tratamento. A análise foi feita para o tratamento de 100.000 m³/ano de painéis OSB, o que equivale a pouco menos de 1/3 da produção de uma fábrica.

O equipamento escolhido para aplicação do tratamento foi a prensa multi-aberturas (15 pratos) de baixa pressão empregada na consolidação de painéis compensados. Esses equipamentos podem ser operados na temperatura requerida pelos tratamentos (190°C e 220°C) e possuem controle de pressão, além de estarem disponíveis no mercado nacional em vários modelos e a custos relativamente competitivos. Essas prensas são distintas das empregadas na consolidação de painéis OSB, que requerem grande capacidade de compressão.

Os equipamentos necessários para o tratamento térmico estão em função do volume de painel tratado (100.000 m³) e do tempo de tratamento (12 ou 20 minutos). A lista de equipamentos requeridos para os tratamentos T3 e T4 são listados na Tabela 47.

TABELA 47 - EQUIPAMENTOS REQUERIDOS PARA OS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.

EQUIPAMENTO	TRATAMENTO	
	T3	T4
Prensa (n.º)	16	11
Carregador/descarregador (n.º)	32	22
Sistema Exaustão (n.º)	1	1
Obras civis (m ²)	480	330
Sistema Resfriamento Painéis	1	1
Mesas distribuidoras (n.º)	16	11
Empilhadeira (n.º)	2	2

Observa-se nesta Tabela 47 que para T3, cujo tempo de tratamento é maior, requer um montante de equipamento maior, em comparação ao tratamento T4. Isso ocorre em função de que o número de pratos da prensa é fixo (15), e para o tratamento de um volume igual de painéis, torna-se necessária a aquisição de uma quantidade maior de equipamentos. Isso determina também que seja necessário um

número maior de mesas transportadoras, uma vez que para cada prensa há necessidade de dois equipamentos destes. A temperatura do tratamento não tem efeito sobre o montante de equipamentos necessários, sendo o tempo de tratamento o fator mais importante.

Levando-se em consideração as informações sobre a energia necessária para aquecer os painéis e a potência instalada dos equipamentos (30 CV prensas e 5 CV transportadores) pôde-se calcular o consumo energético dos tratamentos T3 e T4 (Tabela 48).

TABELA 48 - CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL DOS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.

VARIÁVEL	TRATAMENTO	
	T3	T4
Energia Térmica		
Por painel tratado (kcal)	1.290	1.431
Por volume tratado (kcal/m ³)	43.867	48.645
Quantidade de vapor (kg/m ³)	76	84
Energia total (kcal/ano)	6.360.656.026	7.053.537.946
Quantidade de vapor (kg/ano)	10.947.773	12.140.341
Vazão de vapor (kg/h)	2.012	2.232
Quantidade de resíduo (kg/ano)	2.120.219	2.351.179
Energia Elétrica		
Potência requerida (KWh)	502	345
Consumo anual de energia elétrica (KWh/ano)	2.733.056	1.878.976

Observa-se por esta Tabela que a temperatura tem importância significativa no consumo energético dos tratamentos recomendados, principalmente com relação à energia térmica. O tempo também é um fator importante no consumo, isso porque requer mais equipamentos, o que aumenta o consumo de energia elétrica.

4.5.2. Análise Econômica

A Tabela 49 apresenta o fluxo de caixa, com as entradas (receitas), as saídas (despesas) e o saldo, para cada um dos tratamentos recomendados. O custo de produção foi admitido como sendo fixo e no montante de 90% do preço de venda do produto, ou seja, a margem de lucro foi admitida em 10%.

TABELA 49 - FLUXO DE CAIXA PARA OS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.

ITEM	TRATAMENTO	
	T3	T4
Entradas (R\$1.000/ano)		
Venda Produto ⁽¹⁾	42.050	42.050
Saídas (R\$1.000/ano)		
Custo de Produção ⁽²⁾	-37.845	-37.845
Custo de Tratamento	-1.915	-1.550
Investimento Inicial	-5.296	-3.891
Saldo (R\$1.000/ano)		
1º Ano	-3.006	-1.236
2º - 20º Ano	2.290	2.655

NOTAS: (1) 100.000 m³;

(2) Admitido como sendo 90% do preço de venda do produto.

Comparando-se os dois tratamentos recomendados, observa-se que T4 tem um custo menor que T3, o que indica que o tempo é o fator mais importante na análise econômica. Além disso, tempo maior implica em investimento inicial mais elevado reduzindo assim outras variáveis econômicas, como será visto mais a frente.

Admitindo-se um fluxo de caixa positivo do 2º ao 20º ano do empreendimento, pôde-se determinar a taxa interna de retorno (TIR) e a receita líquida futura em valores atuais (VPL) e cujos resultados são apresentados na Tabela 50.

TABELA 50 - VARIÁVEIS ECONÔMICAS DOS TRATAMENTOS RECOMENDADOS.

VARIÁVEL	TRATAMENTO	
	T3	T4
TIR (%)	43,2	68,2
IBC	3,68	5,81
VPL (R\$1.000.000)	14,2	18,7
Impacto (%) ⁽¹⁾	4,5	3,7
Limite (%) ⁽²⁾	93,0	95,0

NOTAS: (1) aumento no custo de produção;

(2) Limite máximo de aumento do custo de produção, excluído o impacto do tratamento.

Observa-se que o tratamento T4 apresenta variáveis econômicas com valores mais vantajosos que o tratamento T3. A principal explicação é o menor custo de tratamento de T4 (R\$ 15,50/m³) em comparação a T3 (R\$ 19,15/m³) que gera, no período do empreendimento, saldos anuais maiores. O tratamento T4 também é mais flexível à variação do custo de produção em comparação a T3. Dadas as condições de tratamento, mesmo um aumento do custo de produção de 90% para o limite de 95%, ainda mantém o tratamento T4 viável economicamente, com TIR de 12,97% e VPL de R\$ 816 mil. Para T3 este limite é de 93%.

O OSB tratado pode ser considerado um novo produto, mais estável dimensionalmente que o painel não-tratado, e assim pode-se esperar que o seu preço final de comercialização deva ser superior. Partindo dessa premissa, adicionalmente, foi feita uma análise para se avaliar qual deveria ser o preço final do produto tratado para que o tratamento se tornasse viável. Admitiu-se então um prêmio, que foi definido como sendo em quanto deveria ser o preço do OSB tratado deveria, tendo-se como base o preço do OSB não-tratado. A Tabela 51 apresenta as variáveis econômicas calculadas para cada prêmio admitido, partindo-se de um mínimo de 5%.

TABELA 51 - VARIÁVEIS ECONÔMICAS EM FUNÇÃO DO PRÊMIO OBTIDO PELO PAINEL TRATADO.

VARIÁVEIS	TRATAMENTO	PRÊMIO (%)					
		5	6	7	8	9	10
TIR (%)	T3	-3,08	9,67	18,80	27,14	35,22	43,21
	T4	12,96	24,70	35,73	46,60	57,42	68,23
VPL (R\$ 1.000.000)	T3	-3,70	-0,12	3,46	7,04	10,62	14,20
	T4	0,81	4,39	7,97	11,55	15,13	18,71
IBC	T3	0,30	0,98	1,65	2,33	3,01	3,68
	T4	1,21	2,13	3,05	3,97	4,89	5,81

Pode-se observar que o tratamento T3 torna-se viável para prêmios superiores a 7%, com TIR, VPL e IBC assumindo valores positivos. Para o tratamento T4, a viabilidade econômica ocorre já com um prêmio mínimo de 5%, embora a TIR não seja muito vantajosa, por ser inferior ao pago por títulos públicos, que na atualidade é de 16%. Diante do exposto, observa-se que o preço do OSB tratado deve ser de 5-7% superior ao preço do produto não-tratado, o que não deve ser difícil de se obter dada a sua superioridade com relação à estabilidade dimensional.

A Tabela 52 apresenta a discriminação dos diversos itens que compõem o custo total do tratamento (C_{trat}). Os itens que mais pesam no C_{trat} de ambos tratamentos recomendados são o de remuneração de capital (C_{rem}) e o de energia (C_{energ}), que juntos respondem por mais de 50% do C_{trat} .

TABELA 52 - VALORES (R\$/M³) PARA OS DIVERSOS ITENS DO CUSTO TOTAL DE CADA TRATAMENTO RECOMENDADO.

ITEM	TRATAMENTO	
	T3	T4
Custo total do tratamento (C_{trat} , R\$/m ³)	19,15 (100)	15,50 (100)
Depreciação (C_{dep})	2,65 (13,8)	1,95 (12,6)
Remuneração de capital (C_{rem})	5,30 (27,7)	3,89 (25,1)
Manutenção (C_{mat})	1,06 (5,5)	0,78 (5,0)
Mão de obra (C_{mo})	1,58 (8,2)	1,58 (10,2)
Energia (C_{energ})	5,11 (26,7)	3,92 (25,3)
Perdas (C_{perdas})	2,10 (11,0)	2,10 (13,5)
Seguro (C_{seg})	0,26 (1,4)	0,19 (1,3)
Administração (C_{adm})	1,08 (5,7)	1,08 (7,0)

NOTA: Valores entre parênteses indicam a porcentagem em relação ao custo total do tratamento.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados deste estudo e considerando as análises e as discussões apresentadas, conclui-se que o tratamento térmico melhora algumas das propriedades dos painéis, destacando-se:

- Aumento da estabilidade dimensional, reduzindo o inchamento em espessura, a absorção de água e o teor de umidade de equilíbrio; para o inchamento em espessura a redução pode chegar até 50%, enquanto que para absorção até 33%;
- Redução das tensões internas de compressão e da higroscopicidade dos painéis tratados, as quais foram as principais causas do aumento da estabilidade dimensional;

Os ganhos obtidos com relação ao aumento da estabilidade dimensional foram acompanhados pelas seguintes alterações nas demais propriedades:

- Redução de até 23% no módulo de ruptura e a força máxima na ruptura, em ambos os sentidos;
- Alteração da cor dos painéis, tornando-os mais escuros;
- Alteração da composição química dos painéis, principalmente pela degradação das hemiceluloses, sendo a galactose a mais afetada; não ocorreu alteração na proporção da celulose e da lignina;

Analisando-se os efeitos das variáveis, temperatura e tempo, do tratamento térmico sobre as propriedades dos painéis tratados, conclui-se que:

- O efeito da temperatura foi muito mais significativo que o do tempo, afetando todas as propriedades; por outro lado o tempo teve efeito apenas sobre algumas, principalmente as de estabilidade dimensional;

- ❑ Recomenda-se a utilização de dois tratamentos: temperatura mais baixa (190°C) por período mais longo (20 minutos) e temperatura mais elevada (220°C) por um período mais curto (12 minutos); por implicarem melhoria significativa da estabilidade dimensional e não afetarem as propriedades mecânicas, quando se compara com os painéis não-tratados;

Comparando-se os ganhos de estabilidade dimensional dos painéis tratados com o compensado, conclui-se que:

- ❑ O inchamento em espessura mostrou-se superior; entretanto os painéis tratados apresentaram menores valores de teor de umidade de equilíbrio e absorção de água;

Os resultados deste estudo indicaram a viabilidade técnica e econômica do tratamento proposto, dado que:

- ❑ Para ambos tratamentos recomendados as taxas internas de retorno superiores a 40%, valores presentes líquidos superiores a R\$ 10 milhões e índice benefício-custo superior a 1;
- ❑ Simulações indicaram que um prêmio de venda do painel tratado de apenas 7% já implica em variáveis econômicas vantajosas;
- ❑ A adoção da etapa de estabilização dimensional em equipamento próprio, logo após o resfriamento, não implica em mudanças na produtividade, na operacionalidade e na flexibilidade da produção, bem como não altera significativamente o lay-out da fábrica;

A experiência adquirida na condução deste estudo e as conclusões anteriormente apresentadas indicam que o produto tratado termicamente é diferenciado e o melhoramento das propriedades pode contribuir para abrir novas oportunidades de mercado para o OSB no Brasil e em outros países. Entretanto, há ainda alguns aspectos a serem melhor avaliados e aprofundados, e para tal recomenda-se:

- ❑ Avaliar a qualidade da superfície que influencia propriedades tais como: rugosidade, resistência à abrasão, dureza e qualidade de adesão;
- ❑ Avaliar a resistência biológica frente a organismos xilófagos;
- ❑ Realizar estudo sobre o potencial de mercado, identificando possíveis usos e nichos de aplicação;
- ❑ Avaliar o comportamento quando em uso, em especial no relativo aos ganhos de performance.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, R.R. **Potencial da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para a produção de lâminas e manufatura de painéis compensados.** Piracicaba, 2002. 80 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials.** ASTM D1037-98a. ASTM: West Conshohocken. 1998.
- AYADI, N.; LEJEUNE, F.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B.; MERLIN, A. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlim, v. 61, n. 3, p. 221-226. 2003.
- AVRAMIDIS, S.; SMITH, L.A. The effect of resin content and face-to-core ratio on some properties of oriented strand board. **Holzforschung**, Berlim, v. 43, n. 2, p. 131-133, 1989.
- BACK, E.L. The bonding mechanism in hardboard manufacture. **Holzforschung**, Berlim, v. 41, n. 4, p. 247-258. 1987.
- BAILEYS, J.K.; MARKS, B.M.; ROOS, A.S.; CRAWFORD, D.M.; KRZYSIK, A.M.; MUEHL, J.H.; YOUNGQUIST, J.A. Providing moisture and fungal protection to wood-based composites. **Forest Products Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 76-81. 2003.
- BARROS, M.G. **Avaliação na alteração da cor aparente da madeira de mogno, ipê-amarelo, e pau-marfim em ambiente interior, submetidas a tratamentos com seladora.** Brasília, 1999. 40 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília.
- BARROS, J.F.M. **Desdobro e caracterização tecnológica das madeiras de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para indústria moveleira.** Brasília, 2002. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília.
- BEALL, F.C.; EICKNER, H.W. **Thermal degradation of wood components: a review of the literature.** USDA/FPL: Madison, 1970. 26p. (FPL Research Paper 130).
- BEECH, J.C. The thickness swelling of wood particleboard. **Holzforschung**, Berlin, v. 29, n. 1, p. 11-18. 1975.
- BENGTSSON, C.; JERMER, J.; BREM, F. Bending strength of heat-treated spruce and pine timber. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 33, 2002, **Separatas**. Cardiff, 2002. 8 f.
- BHUIYAN, M.T.R; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of intermittent heat treatment on cristallinity in wood cellulose. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 47, n. 5, p. 336-416. 2001.
- BHUIYAN, M.T.R; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of cristallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 46, n. 6, p. 431-436. 2000.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar: Krieger Publishing, 712p. 1993.

BOURGOIS, J.; JANIN, G.; GUYONNET, R. La mesure de couleur: une méthode d'étude et d'optimisation des transformations chimiques du bois thermolysé. **Holzforschung**, Berlim, v. 45, n. 5, p. 377-382. 1991.

BOURGOIS, J.; GUYONNET, R. Characterization and analysis of torrefied wood. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 22, n. 2, p. 143-155. 1988.

BROWN, H.P.; PANSIN, A.J.; FORSAITH, C.C. **Textbook of wood technology**. Vol 2: The physical, mechanical, and chemical properties of the commercial woods of the United States. New York: McGraw-Hill, 1952. 783p.

CAMARGOS, J.A.A.; GONÇALEZ, J.C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 71, p. 30-41. 2001.

CHARRIER, B.; CHARRIER, F.; JANIN, G.; KAMDEM, D.P.; IRMOULI, M.; GONÇALEZ, J. Study of industrial boiling process on walnut colour: experimental study under industrial conditions. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlim, v. 60, n. 4, p. 259-264. 2002.

CHANG, H.T.; CHANG, S.T. Improvements in dimensional stability and lightfastness of wood by butyrylation using microwave heating. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 49, n. 5, p. 455-460. 2003.

CHEN, P.Y.S.; WORKMAN JR., E.C. Effect of steaming on some physical and chemical properties of black walnut heartwood. **Wood and Fiber**, Madison, v. 11, n. 4, p. 218-227. 1980.

CHRISTIANSEN, A.W. Effect of overdrying on toughness of yellow-poplar veneer. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlim, v. 55, n. 1, p. 71-75. 1997.

CHRISTIANSEN, A.W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: a critical review of the literature. Part II. Chemical reaction. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 23, n. 1, p. 69-84. 1991.

CHRISTIANSEN, A.W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: a critical review of the literature. Part I. Physical responses. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 22, n. 4, p. 441-459. 1990.

CHOW, S.Z.; MUKAI, H.N. Effect of thermal degradation of cellulose on wood-polymer bonding. **Wood Science**, Madison, v. 4, n. 4, p. 202-208. 1972.

CHOW, S.Z.; PICKLES, K.J. Thermal softening and degradation of wood and bark. **Wood and Fiber**, Madison, v. 3, n. 3, p. 166-178. 1971.

CLOUTIER, A. Oriented strandboard (OSB): raw material, manufacturing process, properties and uses. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE ALTA TECNOLOGIA, 1, 1998, Belo Horizonte, **Anais**. Viçosa: SIF, 1998. p. 173-185.

CURLING, S.; CLAUSEN, C.A.; WINANDY, J.E. The effect of hemicellulose degradation on the mechanical properties of wood during brown rot decay. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 32, 2001, **Separatas**. Nara, 2001. 10 f.

CUTTER, B.E.; CUMBIE, B.G.; MCGINNIS, JR., E.A. SEM and shrinkage analyses of southern pine wood following pyrolysis. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 14, n. 2, p. 115-130. 1980.

DAI, C. Viscoelasticity of wood composites mats during consolidation. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 33, n. 3, p. 353-363. 2001.

DEL MENEZZI, C.H.S. **Retificação térmica de painéis de partículas orientadas: efeito sobre a estabilidade dimensional**. Curitiba, 2001. 29 f. Monografia (Conclusão de Disciplina de Pós-graduação). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

DEL MENEZZI, C.H.S.; SOUZA, M.R.; GONÇALEZ, J.C. Fabricação e avaliação tecnológica da chapa aglomerada de mistura de *Eucalyptus urophylla* T.S. Blake e *Pinus oocarpa* Schiede. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 3, p. 371-379. 1996.

DOI, S.; KURIMOTO, Y.; OHMURA, W.; OHARA, S.; AOYAMA, M.; YOSHIMURA, T. Effects of heat treatment of wood on the feeding behavior of two subterranean termites. **Holzforschung**, Berlim, v. 53, n. 3, p. 225-229. 1999.

DOI, S.; TAKAHASHI, M.; YOSHIMURA, T.; KUBOTA, M.; ADACHI, A. Attraction of steamed japanese larch (*Larix leproles* (Sieb. et Zucc) Gord.) heart wood to the subterranean termite *Coptotermes formosans* Shiraki (Isoptera: Rhinotermitidae). **Holzforschung**, Berlim, v. 52, n. 1, p. 7-12. 1998.

EL-OSTA, M.L.M.; WELLWOOD, R.W. Short-term creep as related to cellulose crystallinity. **Wood and Fiber**, Madison, v. 4, n. 3, p. 201-211. 1972.

FEIST, W.C.; SELL, J. Weathering behavior of dimensionally stabilized wood treated by heating under pressure of nitrogen gas. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 19, n. 2, p. 183-195. 1987.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: Walter de Gruyter. 613p. 1989.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. Nobel: São Paulo, 1985. 111p.

GEIMER, R.L.; KWON, J.H. Flakeboard thickness swelling. Part II. Fundamental response of board properties to steam injection pressing. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 31, n.1, p. 15-27. 1999.

GOUVEIA, F.N.; SANTANA, M.A.E.; SOUZA, M.R. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus urophylla* S.T Blake na fabricação de chapas de partículas orientadas (OSB) e não-orientadas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 7-12. 2000.

GOROYIAS, G.J.; HALE, M.D. Heat treatment of wood strands for OSB production: effect on the mechanical properties, water absorption and dimensional stability. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 33, 2002, **Separatas**. Cardiff, 2002. 18 f.

GREEN, D.W.; EVANS, J.W.; CRAIG, B.A. Durability of structural lumber products at high temperatures. Part I. 66°C at 75% RH and 82°C at 30% RH. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 35, n. 4, p. 499-523. 2003.

HALLIGAN, A.F. A review of thickness swelling in particleboard. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 4, n. 3, p. 301-312. 1970

HASHIM, R.; HOW, L.S.; OTHMAN, S.; YAMAMOTO, K. Effect of extractive removal on dimensional stability and bonding properties of particleboard made from hybrid of *Acacia*. **Journal of the Institute of Wood Science**, Buckinghamshire, v. 15, n. 5, p. 261-266. 2001.

HAYGREEN, J.G.; BOWYER, J.L. **Forest products and wood science: an introduction**. Iowa State University Press: Ames, 3^a ed, 1996. 484p.

HEEBINK, B.G.; HEFTY, F.V. Treatments to reduce thickness swelling of phenolic-bonded particleboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 19, n. 11, p. 17-26. 1969.

HIETALA, S.; MAUNU, S.L.; SUNDHOLM, F.; JAMSA, S.; VIITANIEMI, P. Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements. **Holzforschung**, Berlim, v. 56, n. 5, p. 522-528. 2002.

HILL, C.A.S.; MALLON, S. The chemical modification of scots pine with succinic anhydride or octenyl succinic anhydride. I. Dimensional stabilization. **Holzforschung**, Berlim, v. 52, n. 4, p. 427-433. 1999.

HILLIS, W.E. High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: General considerations. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 18, n. 4, p. 281-293. 1984.

HOFFMANN, P. On the stabilization of waterlogged softwoods with polyethylene glycol (PEG). Four species from China and Korea. **Holzforschung**, Berlim, v. 44, n. 2, p. 87-93. 1990. [Resumo obtido no TREE-CD (CAB)]

HOFFMANN, P. On the stabilization of waterlogged oakwood with polyethylene glycol (PEG). **Holzforschung**, Belim, v. 42, n. 5, p. 289-294. 1988. [Resumo obtido no TREE-CD (CAB)]

HOUTS, J.v.; WINISTORFER, P.M.; WANG, S. Improving dimensional stability by acetylation of discrete layers within flakeboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 82-88. 2003.

HSU, W.E.; SCHWALD, W.; SHIELDS, J.A. Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composites. Part 2: Heat post-treatment. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 23, n. 3, p. 281-288. 1989.

HSU, W.E.; SCHWALD, W.; SCHWALD, J.; SHIELDS, J.A. Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composites. Part 1: Steam pretreatment. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 22, n. 3, p. 281-289. 1988.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de preservação de madeiras**. IPT/Dimad: São Paulo, 1986. Vol I. 341p.

ISHIGURI, F.; MARUYAMA, S.; TAKAHASHI, K.; ABE, Z.; YOKOTA, S.; ANDOH, M.; YOSHIZAWA, N. Extractives relating to heartwood color changes in sugi (*Cryptomeria japonica*) by a combination of smoke-heating and UV radiation exposure. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 49, n. 2, p. 135-139. 2003.

ISHIGURI, F.; ANDOH, M.; YOKOTA, S.; YOSHIKAWA, N. Effect of smoke heating on moisture content, surface checking and dynamic Young's modulus of sugi (*Cryptomeria japonica*) boxed heart timber. **Mokuzai Gakkaishi**, Tóquio, v. 47, n. 4, p. 350-357. 2001a. (Em japonês).

ISHIGURI, F.; MASUBUCHI, N.; MARUYAMA, S.; ANDOH, M.; YOKOTA, S.; YOSHIKAWA, N. Changes of wood quality in conifer woods by smoke heating. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 7., 2001. **Proceedings**, Tsukuba: FFPR, 2001b. p. 398-401.

IWAKIRI, S.; MENDES, L.M.; SALDANHA, L.K. Produção de chapas de partículas orientadas "OSB" de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de resina, parafina e composição de chapa. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 89-94. 2003.

IWAKIRI, S.; COSTA, A.F.; KLITZE, R.J.; NIELSEN, I.R.; ALBERTI, R.A.R.; NIEFE, I. Produção de chapas de madeira aglomerada de *Pinus elliotti* Engelm. com inclusão laminar. **Cerne**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 86-94. 1999.

JONES, D.; STROMDAHL, K.; HOFFMEYER, P.; FOLTING, P. FISCHER, G.; OLSEN, A. The hygrothermal treatment of natural fibres: Part 1 - spruce. In: EUROPEAN PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 3, Biocomposites Centre, Llandudno, 1999, **Proceedings**, 1999. p. 54-65.

JORDAN, D.L.; WELLONS, J.D. Wettability of dipterocarp veneers. **Wood Science**, Madison, v. 10, n. 1, p. 22-27. 1977.

KALLANDER, B.; BENGESSION, C.; DAHLBERG, J. Influence of drying in temperatures between 70°C and 120°C on selected wood properties of norway spruce. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 7., 2001. **Proceedings**, Tsukuba: FFPR, 2001. p. 306-311.

KAJITA, H.; IMAMURA, Y. Chemically modified particleboards. In: **Recent Developments in Materials Science**. Elsevier: Tokyo, 1993, p.67-73.

KELLY, M.R. **Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard**. USDA/FS: Madison, 1977. 10p. (General Technical Report FPL-10).

KIM, G-H.; YUN, K-E.; KIM, J-J. Effect of heat treatment on the decay resistance and the bending properties of radiata pine sapwood. **Material und Organismen**, Berlin, v. 32, n.2, p. 101-108. 1998.

KOLIN, B.; JANEZIC, T.S. The effect of temperature, density and chemical composition upon the limit of higroscopicity of wood. **Holzforschung**, Berlim, v. 50, n. 3, p. 263-268. 1996.

KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of wood science and technology**. Vol. II Wood based materials. New York: Springer-Verlag, 702p. 1975.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ JR., W.A. **Principles of wood science and technology**. Vol I: Solid wood. New York: Springer-Verlag, 592p. 1968.

KOSIKOVA, B.; HRICOVINI, M.; COSENTINO, C. Interaction of lignin and polysaccharides in beech wood (*Fagus sylvatica*) during drying processes. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 33, n. 5, p. 373-380. 1999.

KOZLIK, C.J. Effect of temperature, time and drying medium on the strength and gluability of douglas-fir and southern pine. **Forest Products Journal**, Madison, v. 24, n.2, p. 46-53. 1974.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. Bending strength and toughness of heat-treated wood. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 46, n. 1, p. 8-15. 2000.

KWON, J.H.; GEIMER, R.L. Impact of steam pressing variables on the dimensional stabilisation of flakeboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 4, p. 55-61. 1998.

LANDROCK, A.H. **Handbook of adhesives**. New York: Noyes Publications. 1985.

LEE, J.N.; WU, Q. In-plane dimensional stability of three-layer oriented strandboard. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 77-95. 2002.

LEHMANN, W.F. Moisture stability relationships in wood-base composition boards. **Forest Products Journal**, Madison, v. 22, n. 7, p. 53-59. 1972.

LENTH, C.A.; KAMKE, F.A. Moisture dependent softening behavior of wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 33, n. 3, p. 492-507. 2001.

LOUSTARINEN, K.; LOUSTARINEN, J. Discolouration and deformations of birch parquet boards during conventional drying. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 35, n. 6, p. 517-528. 2001.

MALONEY, T.M. The family of wood composites materials. **Forest Products Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p. 19-26. 1996.

MATSUMOTO, T.; MATSUMOTO, H.; FUJIMOTO, N.; FUJIMOTO, Y.; MURASE, Y. Influence of thermal treatments on the mechanical properties of wood. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 7., 2001. **Proceedings**, Tsukuba: FFPR, 2001. p. 430-433.

MENDES, L.M.; ALBUQUERQUE, C.E.C.; IWAKIRI, S. A indústria brasileira de painéis de madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, Edição Especial: Painéis. p. 12-20, 2003.

MENDES, L.M. ***Pinus spp.* na produção de painéis de partículas orientadas**. Curitiba, 2001. 156 f. Doutorado (Doutor em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

MILITZ, H. Thermal treatment of wood: European processes and their background. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 33, 2002, **Separatas**. Cardiff, 2002. 10 f.

MITCHELL, P.H. Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 20, n. 3, p. 320-335. 1988.

MOSLEMI, A.A. **Particleboard**. Vol 1: Materials. Southern Illinois University Press: Carbondale, 1974. 244p.

NASSAR, M. M.; MacKAY, G.D.M. Mechanism of thermal decomposition of lignin. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 16, n. 3, p. 441-453. 1984.

NEGRO, M.J.; MANZANARES, P.; OLIVA, J.M.; BALLESTEROS, I.; BALLESTEROS, M. Changes in various physical/chemical parameters of *Pinus pinaster* wood after steam explosion pretreatment. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, n. 3, p. 301-308. 2003.

NOGI, M.; YAMAMOTO, H.; OKUYAMA, T. Relaxation mechanism of residual stress inside logs by heat treatment: choosing the heating time and temperature. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 49, n. 1, p. 22-28. 2003.

NORIMOTO, M.; GRIL, J. Structure and properties of chemically treated wood. In: **Recent Developments in Materials Science**. Elsevier: Tokyo, 1993, p.135-144.

OHLMEYER, M.; KRUSE, K. Hot stacking and its effects on panel properties. In: EUROPEAN PANEL PRODUCTS SYMPOSIUM, 3, 1999, **Proceedings**. Cardiff, 1999. 293-300.

OKINO, E.Y.A.; SOUZA, M.R.; SANTANA, M.A.E.; ANDAHUR, J.P.V. Resistência ao ataque de fungos de chapas aglomeradas de bagaço de cana-de-açúcar modificado quimicamente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 53, p. 81-86. 1998.

OKINO, E.Y.A.; ANDAHUR, J.P.V.; SANTANA, M.A.E.; SOUZA, M.R. Resistência físico-mecânica de chapas aglomeradas de bagaço de cana-de-açúcar modificado quimicamente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 52, p. 35-42. 1997.

OTA, M.; MOZAMMEL, H.M. Chemical kinetics of japanese cedar, cypress, fir and spruce and characterization of carchoal. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 49, n. 3, p. 248-254. 2003.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. Vol 1: Structure, identification, uses, and properties of the commercial wood of the United States and Canada. New York: McGraw-Hill, 1970. 705p.

PAZ, J.J.; SANABRIA, E.O. Dimensional stabilization of *Aspidosperma quebracho-blanco* with polyethylene glycol. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 21., Kuala Lumpur, 2000, **Proceedings**, IUFRO: Kuala Lumpur, 2000, Vol. 3, p. 236.

PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P.; EL BAKALI, I.; SERRAJ, M. Wettability of heat-treated wood. **Holzforschung**, Berlim, v. 57, n. 3, p. 301-307. 2003.

PINCELLI, A.L.P.S.M.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. Avaliação da termorreificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 61, p. 122-132. 2002.

PINCELLI, A.L.P.S.M. **Efeito da termorreificação no envernizamento, colagem e cor da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. Piracicaba, 115 f. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

PIO, N.S. **Produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden**. Curitiba, 2002. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). UFPR.

PIO, N.S. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus scabra* (Dum-Cours) e *Eucalyptus robusta* (Smith) na produção de painéis compensados.** Curitiba, 1996. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). UFPR.

REVISTA DA MADEIRA. Exportações atingem US\$ 4,4 bilhões em 2002. Curitiba: ABPM, n. 12, mar. 2003, p. 4-10.

ROFFAEL, E.; RAUCH, W. Einfluß von temperatur und thermischer nachbehandlung auf einige physikalisch eigenschaften von diisocyanat-gebundenen spanplatten. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlim, v. 31, n. 10, p. 402-405. 1973.

ROWELL, R.M.; KAWAI, S.; INOUE, M. Dimensionally stabilized very low density fiberboard. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 27, n. 4, p. 428-436. 1995.

ROWELL, R.M.; YOUNGS, R.L. **Dimensional stabilization of wood in use.** Washington: USDA, 8p, 1981. (Research Note, FPL-0243).

SANDOE, M.D.; WELLONS, J.D. PARKER, R.J.; JOKERST, R. Gluability of platen-dried veneer of douglas-fir. **Forest Products Journal**, Madison, v. 33, n. 7/8, p. 57-62. 1983.

SANTOS, J.A. Mechanical behavior of eucalyptus wood modified by heat. **Wood Science and Technology**, Berlim, v. 34, n. 1, p. 39-43. 2000.

SARNI, F.; MOUTONET, M.; PUECH, J.L.; RABIER, P. Effect of heat treatment of oak extractable compounds. **Holzforschung**, Berlim, v. 44, n. 6, p. 461-466. 1990.

SEKINO, N.; INOUE, M.; IRLE, M. ; ADCOCK, T. The mechanism behind the improved dimensional stability of particleboards made from steam-pretreated particles. **Holzforschung**, Berlim, v. 53, n. 4, p. 435-440. 1999.

SEKINO, N. et al. The bond quality of steam pre-treated particles. In: European Panel Products Symposium, 2, Llandudno, 1998, **Proceedings**, BCC: Llandudno 1998. p. 30-38.

SEVERO, E.T.D.; TOMASELLI, I.; BONDUELLE, G.M. Efecto del tratamiento del vaporizado sobre la compresión paralela y perpendicular al grano y cizallamiento de la madera de *Eucalyptus dunni*. In: Congreso Panamericano de Desarrollo de Productos Forestales, 1., 2000, Concepcion, **Anales**, Concepcion, 2000. (CD-Rom).

SHEN, K.C. Improving the surface quality of particleboard by high-temperature pressing. **Forest Products Journal**, Madison, v. 24, n. 10, p. 36-39. 1974.

SIVONEN, H.; MAUNU, S.L.; SUNDHOLM, F.; JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. **Holzforschung**, Berlim, v. 56, n. 6, p. 648-654. 2002.

SKAAR, C. **Wood-water relations.** Springer-Verlag: Berlim, 1988. 283p.

SOUZA, M.R.; DEL MENEZZI, C.H.S. ANDRADE, A. **Avaliação tecnológica da madeira de espécies de eucalipto e de pinus para a produção de painéis aglomerados e de partículas orientadas (OSB).** Brasília: FUNTEC, 1999, 19p.

SOUZA, M.R.; TEIXEIRA, D.E. **Compostos à base de madeira.** IBAMA: Brasília, 2002. 22p.

- STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.
- SUCHSLAND, O.; ENLOW, P. Heat treatment of exterior particleboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 18, n. 8, p. 24-28. 1968.
- SUCHSLAND, O.; XU, H. Model analysis of flakeboard variables. **Forest Products Journal**, Madison, v. 41, n. 11/12, p. 55-61. 1991.
- SUNDQVIST, B. Color response of scots pine (*Pinus sylvestris*), Norway spruce (*Picea abies*) and birch (*Betula pubescens*) subjected to heat treatment in capillary phase. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlim, v. 60, n. 2, p. 106-114. 2002.
- SYRJÄNEN, T.; KANGAS, E. Heat treated timber in Finland. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 29, 1998, **Separatas**. Kona, 2000. 10 f.
- TJEERDSMA, B.F.; STEVENS, M.; MILITZ, H. Durability aspects of (hydro) thermal treated wood. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 31, 2000, **Separatas**. Kona, 2000. 7 f.
- TJEERDSMA, B.F.; BOONSTRA, M.; MILITZ, H. Thermal modification of non-durable wood species 2. Improved wood properties of thermally treated wood. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 29, 1998, **Separatas**. Maastricht, 1998a. 10 f.
- TJEERDSMA, B.F.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; TEKELY, P., MILITZ, H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlim, v. 56, n. 3, p. 149-153. 1998b.
- TOMASELLI, I. **The influence of high-temperature drying on some physical and mechanical properties of *Pinus radiata* D. Don**. University of Melbourne, 1977. 264p. (PhD Thesis).
- TROUGHTON, G.E.; CHOW, S. Heat-induced color-intensity change in coastal douglas-fir and white spruce. **Wood and Fiber**, Madison, v. 4, n. 4, p. 259-263. 1973.
- UMEMURA, K.; KAWAI, S. Durability of isocyanate resin adhesives for wood III: degradation under constant dry heating. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 48, n. 5, p. 380-386. 2002.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood Handbook: wood as engineering material**. USDA: Washington, 473p. 1999.
- VITAL, B.R.; DELA LUCIA, R.M.; EUCLIDES, R.F. Efeito do aquecimento em algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 7, n. 2, p. 136-146. 1983.
- VITAL, B.R.; DELA LUCIA, R.M. Efeito do aquecimento na estabilidade dimensional e na higroscopicidade da madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 6, n. 2, p. 150-161. 1982.
- VITAL, B.R.; WILSON, J.B.; KANAREK, P.H. Parameters affecting dimensional stability of flakeboard and particleboard. **Forest Products Journal**, Madison, v. 30, n. 12, p. 23-29. 1980.

WALKER, J.C.F. **Primary wood processing: principles and practices**. London: Chapman & Hall, 663p., 1993.

WANGAARD, F.F. **The mechanical properties of wood**. New York: John Wiley & Sons, 376p. 1950.

WEILAND, J.J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh-Werkstoff**, v. 61, n. 2, p. 216-220. 2003.

WELZBACHER, C.R.; RAPP, A.O. Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes - durability. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 33, 2002, **Separatas**. Cardiff, 2002. 13 f.

WENZL, H.F.J. **The chemical technology of wood**. Academic Press: New York, 1970. 692p.

WINISTORFER, P.M.; McFARLAND, D.L.; SLOVER, R.C. Evaluating the performance of ten wax formulation and three application rates on properties of oriented strandboard. In: INTERNATIONAL PARTICLEBOARD/COMPOSITE MATERIAL SYMPOSIUM, 26, 1992, **Proceedings**. Pullman, 1992. 236-250.

WOLLCOTT, M.P.; KAMKE, F.A.; DILLARD, D.A. Fundamental of flakeboard manufacture: viscoelastic behavior. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 22, n. 4, p. 345-361. 1990.

WU, Q.; LEE, J.N. Thickness swelling of oriented strandboard under long-term cyclic humidity exposure condition. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 125-139. 2002.

WU, Q.; REN, Y. Characterization of sorption behavior of oriented strandboard under long-term cyclic humidity exposure condition. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 32, n. 4, p. 404-418. 2000.

YALINKILIC, M.K.; IMAMURA, Y.; TAKAHASHI, M. YALINKILIC, A.C. *In situ* polymerization of vinyl monomers during compressive deformation of wood treated with boric acid to delay boron leaching. **Forest Products Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 43-51. 1999.

YAMAMOTO, K.; OHMURA, W.; MOMOHARA, I. Influence of high temperature drying on wood durability. In: INTERNATIONAL IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 7., 2001. **Proceedings**, Tsukuba: FFPR, 2001. p. 318-321.

YILDIZ, S.; ÇOLAKOĞLU, G.; YILDIZ, U.C.; GEZER, E.D.; TEMİZ, A. Effects of heat treatment on modulus of elasticity of beech wood. In: ANNUAL MEETING INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 33, 2002, **Separatas**. Cardiff, 2002. 6 f.

ZAMAN, A.; ALÉN, R.; KOTILAINEN, R. Thermal behavior of scots pine (*Pinus sylvestris*) and silver birch (*Betula pendula*) at 200-230°C. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 32, n. 2, p. 138-143. 2000.

**ANEXO 1 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES AVALIADAS
DE ACORDO COM O TRATAMENTO.**

TABELA 1 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
IE2H	TESTEMUNHA	8,9072	1,03082	6
	T1 (190C, 12 MIN)	6,5333	0,63455	6
	T2 (190C, 16 MIN)	6,8951	1,00770	6
	T3 (190C, 20 MIN)	6,5087	1,35612	6
	T4 (220C, 12 MIN)	5,0569	1,03786	6
	T5 (220C, 16 MIN)	4,0017	0,49192	6
	T6 (220C, 20 MIN)	3,5639	0,34319	6
ABS2H	TESTEMUNHA	19,1676	4,31983	6
	T1 (190C, 12 MIN)	14,5952	3,14920	6
	T2 (190C, 16 MIN)	17,9023	3,69517	6
	T3 (190C, 20 MIN)	18,0973	4,78353	6
	T4 (220C, 12 MIN)	15,0423	2,79605	6
	T5 (220C, 16 MIN)	10,7740	2,94613	6
	T6 (220C, 20 MIN)	9,7037	0,85899	6
IE24H	TESTEMUNHA	18,6431	1,73162	6
	T1 (190C, 12 MIN)	15,0701	1,10814	6
	T2 (190C, 16 MIN)	14,9768	0,83625	6
	T3 (190C, 20 MIN)	14,3982	0,44862	6
	T4 (220C, 12 MIN)	12,7207	1,27623	6
	T5 (220C, 16 MIN)	10,7118	0,43580	6
	T6 (220C, 20 MIN)	9,4275	0,32323	6
ABS24H	TESTEMUNHA	48,7560	6,43352	6
	T1 (190C, 12 MIN)	40,0951	4,86590	6
	T2 (190C, 16 MIN)	46,5132	4,97595	6
	T3 (190C, 20 MIN)	47,3437	5,57696	6
	T4 (220C, 12 MIN)	39,7053	6,86921	6
	T5 (220C, 16 MIN)	35,8191	4,59021	6
	T6 (220C, 20 MIN)	32,2518	7,82571	6
TNRE	TESTEMUNHA	8,2329	2,15584	6
	T1 (190C, 12 MIN)	4,7712	0,64378	6
	T2 (190C, 16 MIN)	5,7127	1,41460	6
	T3 (190C, 20 MIN)	4,8118	2,39980	6
	T4 (220C, 12 MIN)	2,1057	1,82002	6
	T5 (220C, 16 MIN)	0,8753	1,03868	6
	T6 (220C, 20 MIN)	0,4516	1,32176	6
TUINIC	TESTEMUNHA	9,2790	0,08085	6
	T1 (190C, 12 MIN)	9,2291	0,38901	6
	T2 (190C, 16 MIN)	8,9353	0,29504	6
	T3 (190C, 20 MIN)	8,9661	0,32868	6
	T4 (220C, 12 MIN)	9,2908	0,36817	6
	T5 (220C, 16 MIN)	9,3571	0,46325	6
	T6 (220C, 20 MIN)	9,0880	0,22877	6

CONTINUA

TABELA 1 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
TUE	TESTEMUNHA	9,2790	0,08085	6
	T1 (190C, 12 MIN)	7,7374	0,47436	6
	T2 (190C, 16 MIN)	7,1745	0,32034	6
	T3 (190C, 20 MIN)	6,9315	0,56448	6
	T4 (220C, 12 MIN)	6,7323	0,68900	6
	T5 (220C, 16 MIN)	5,9324	0,90953	6
	T6 (220C, 20 MIN)	5,0198	0,65404	6
MEINIC	TESTEMUNHA	0,6299	0,03050	6
	T1 (190C, 12 MIN)	0,6500	0,02604	6
	T2 (190C, 16 MIN)	0,6458	0,03748	6
	T3 (190C, 20 MIN)	0,6389	0,04405	6
	T4 (220C, 12 MIN)	0,6379	0,03347	6
	T5 (220C, 16 MIN)	0,6506	0,03924	6
	T6 (220C, 20 MIN)	0,6419	0,04340	6
ME _{TRAT}	TESTEMUNHA	-	-	-
	T1 (190C, 12 MIN)	0,6499	0,0186	6
	T2 (190C, 16 MIN)	0,6458	0,0232	6
	T3 (190C, 20 MIN)	0,6389	0,0217	6
	T4 (220C, 12 MIN)	0,6378	0,0212	6
	T5 (220C, 16 MIN)	0,6506	0,3007	6
	T6 (220C, 20 MIN)	0,6419	0,03747	6
PMAT	TESTEMUNHA	-	-	-
	T1 (190C, 12 MIN)	9,255	0,468	6
	T2 (190C, 16 MIN)	9,473	0,348	6
	T3 (190C, 20 MIN)	10,094	0,305	6
	T4 (220C, 12 MIN)	10,369	0,103	6
	T5 (220C, 16 MIN)	10,650	0,385	6
	T6 (220C, 20 MIN)	11,941	0,396	6
PDMAT	TESTEMUNHA	-	-	-
	T1 (190C, 12 MIN)	1,384	0,177	6
	T2 (190C, 16 MIN)	1,643	0,124	6
	T3 (190C, 20 MIN)	1,903	0,249	6
	T4 (220C, 12 MIN)	2,398	0,367	6
	T5 (220C, 16 MIN)	3,236	0,467	6
	T6 (220C, 20 MIN)	3,876	0,506	6

TABELA 2 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
MOR//	TESTEMUNHA	33,95	3,71	6
	T1 (190C, 12 MIN)	30,18	3,96	6
	T2 (190C, 16 MIN)	32,70	4,68	6
	T3 (190C, 20 MIN)	30,80	2,64	6
	T4 (220C, 12 MIN)	29,96	2,59	6
	T5 (220C, 16 MIN)	28,31	3,60	6
	T6 (220C, 20 MIN)	25,87	4,89	6
MOE//	TESTEMUNHA	5.817,87	281,55	6
	T1 (190C, 12 MIN)	5.496,71	574,40	6
	T2 (190C, 16 MIN)	5.433,17	1.035,45	6
	T3 (190C, 20 MIN)	5.414,56	421,95	6
	T4 (220C, 12 MIN)	4.877,83	963,73	6
	T5 (220C, 16 MIN)	5.709,09	370,99	6
	T6 (220C, 20 MIN)	5.311,19	614,56	6
FM//	TESTEMUNHA	961,24	118,88	6
	T1 (190C, 12 MIN)	865,39	96,82	6
	T2 (190C, 16 MIN)	949,71	101,61	6
	T3 (190C, 20 MIN)	888,47	111,17	6
	T4 (220C, 12 MIN)	822,54	95,47	6
	T5 (220C, 16 MIN)	806,43	126,34	6
	T6 (220C, 20 MIN)	741,55	170,52	6
MOR⊥	TESTEMUNHA	21,64	1,64	6
	T1 (190C, 12 MIN)	23,35	1,04	6
	T2 (190C, 16 MIN)	22,12	1,55	6
	T3 (190C, 20 MIN)	20,45	2,03	6
	T4 (220C, 12 MIN)	19,80	3,20	6
	T5 (220C, 16 MIN)	20,52	3,04	6
	T6 (220C, 20 MIN)	18,58	1,64	6
MOE⊥	TESTEMUNHA	2.468,36	409,79	6
	T1 (190C, 12 MIN)	2.647,89	179,72	6
	T2 (190C, 16 MIN)	2.575,31	155,40	6
	T3 (190C, 20 MIN)	2.571,95	195,62	6
	T4 (220C, 12 MIN)	2.615,58	264,50	6
	T5 (220C, 16 MIN)	2.687,54	231,21	6
	T6 (220C, 20 MIN)	2.564,61	98,05	6
FM⊥	TESTEMUNHA	610,61	71,13	6
	T1 (190C, 12 MIN)	670,92	44,64	6
	T2 (190C, 16 MIN)	634,21	50,60	6
	T3 (190C, 20 MIN)	589,90	88,15	6
	T4 (220C, 12 MIN)	569,22	122,95	6
	T5 (220C, 16 MIN)	579,55	126,73	6
	T6 (220C, 20 MIN)	531,64	70,53	6

CONTINUA

TABELA 2 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
LI	TESTEMUNHA	528,56	70,12	6
	T1 (190C, 12 MIN)	556,79	47,54	6
	T2 (190C, 16 MIN)	557,74	86,76	6
	T3 (190C, 20 MIN)	534,07	43,25	6
	T4 (220C, 12 MIN)	537,00	39,14	6
	T5 (220C, 16 MIN)	534,45	53,48	6
	T6 (220C, 20 MIN)	557,56	78,40	6
MOECOMP//	TESTEMUNHA	11.881,44	1.015,20	6
	T1 (190C, 12 MIN)	12.047,93	1.230,80	6
	T2 (190C, 16 MIN)	10.854,76	575,55	6
	T3 (190C, 20 MIN)	10.700,99	1.454,34	6
	T4 (220C, 12 MIN)	10.651,14	2.111,63	6
	T5 (220C, 16 MIN)	11.848,41	2.070,19	6
	T6 (220C, 20 MIN)	11.391,72	1.495,03	6
COMP//	TESTEMUNHA	17,77	2,68	6
	T1 (190C, 12 MIN)	17,25	1,99	6
	T2 (190C, 16 MIN)	15,04	1,08	6
	T3 (190C, 20 MIN)	14,56	3,01	6
	T4 (220C, 12 MIN)	16,08	3,36	6
	T5 (220C, 16 MIN)	16,61	3,41	6
	T6 (220C, 20 MIN)	16,73	2,28	6
MOECOMP⊥	TESTEMUNHA	12.160,91	2.666,80	6
	T1 (190C, 12 MIN)	11.688,45	1.549,07	6
	T2 (190C, 16 MIN)	10.972,69	2.256,95	6
	T3 (190C, 20 MIN)	11.594,32	2.258,32	6
	T4 (220C, 12 MIN)	11.482,15	2.161,45	6
	T5 (220C, 16 MIN)	11.071,58	2.275,17	6
	T6 (220C, 20 MIN)	9.975,86	2.861,36	6
COMP⊥	TESTEMUNHA	17,97	3,76	6
	T1 (190C, 12 MIN)	17,05	2,20	6
	T2 (190C, 16 MIN)	15,47	3,44	6
	T3 (190C, 20 MIN)	16,77	3,58	6
	T4 (220C, 12 MIN)	15,57	3,47	6
	T5 (220C, 16 MIN)	15,58	3,35	6
	T6 (220C, 20 MIN)	14,69	3,15	6
MOED// ₁	TESTEMUNHA	51.646,82	2.404,05	6
	T1 (190C, 12 MIN)	51.847,35	2.897,53	6
	T2 (190C, 16 MIN)	50.493,88	1.940,71	6
	T3 (190C, 20 MIN)	50.406,65	2.876,18	6
	T4 (220C, 12 MIN)	49.527,04	2.847,94	6
	T5 (220C, 16 MIN)	50.464,29	3.798,01	6
	T6 (220C, 20 MIN)	49.708,24	2.910,87	6

CONTINUA

TABELA 2 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
MOED _{⊥1}	TESTEMUNHA	42.368,96	4.507,50	6
	T1 (190C, 12 MIN)	41.868,90	4.332,59	6
	T2 (190C, 16 MIN)	43.761,12	5.322,95	6
	T3 (190C, 20 MIN)	43.657,89	4.093,71	6
	T4 (220C, 12 MIN)	43.191,25	4.498,36	6
	T5 (220C, 16 MIN)	44.523,39	5.410,32	6
	T6 (220C, 20 MIN)	41.924,72	6.176,57	6
MOED _{//3}	TESTEMUNHA	51.646,82	2.404,05	6
	T1 (190C, 12 MIN)	52.562,37	2.138,60	6
	T2 (190C, 16 MIN)	52.255,22	2.409,11	6
	T3 (190C, 20 MIN)	48.527,50	3.554,78	6
	T4 (220C, 12 MIN)	49.005,64	3.042,21	6
	T5 (220C, 16 MIN)	50.481,46	4.784,67	6
	T6 (220C, 20 MIN)	49.954,17	3.620,87	6
MOED _{⊥3}	TESTEMUNHA	42.368,96	4.507,50	6
	T1 (190C, 12 MIN)	43.835,28	2.661,36	6
	T2 (190C, 16 MIN)	44.094,09	5.217,00	6
	T3 (190C, 20 MIN)	42.823,41	3.145,72	6
	T4 (220C, 12 MIN)	43.133,72	5.156,11	6
	T5 (220C, 16 MIN)	44.442,69	5.094,05	6
	T6 (220C, 20 MIN)	43.755,19	7.182,48	6

TABELA 3 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
L	TESTEMUNHA	59,0931	1,61137	6
	T1 (190C, 12 MIN)	57,9698	2,28629	6
	T2 (190C, 16 MIN)	56,7363	1,78111	6
	T3 (190C, 20 MIN)	54,9433	1,00310	6
	T4 (220C, 12 MIN)	49,8942	3,46989	6
	T5 (220C, 16 MIN)	47,0349	3,30709	6
	T6 (220C, 20 MIN)	47,2144	2,98809	6
a*	TESTEMUNHA	10,4858	0,49649	6
	T1 (190C, 12 MIN)	11,3476	0,46748	6
	T2 (190C, 16 MIN)	11,9736	1,04627	6
	T3 (190C, 20 MIN)	11,9146	0,36961	6
	T4 (220C, 12 MIN)	11,7916	0,47867	6
	T5 (220C, 16 MIN)	11,4089	0,60475	6
	T6 (220C, 20 MIN)	11,3644	0,27880	6
b*	TESTEMUNHA	29,1639	1,01814	6
	T1 (190C, 12 MIN)	29,0617	1,03204	6
	T2 (190C, 16 MIN)	28,8376	0,83556	6
	T3 (190C, 20 MIN)	28,4974	0,79324	6
	T4 (220C, 12 MIN)	24,9040	1,97369	6
	T5 (220C, 16 MIN)	22,7156	2,19204	6
	T6 (220C, 20 MIN)	23,0509	1,88840	6
C	TESTEMUNHA	31,0075	1,06612	6
	T1 (190C, 12 MIN)	31,2093	0,97308	6
	T2 (190C, 16 MIN)	31,2429	1,07609	6
	T3 (190C, 20 MIN)	30,9011	0,72245	6
	T4 (220C, 12 MIN)	27,5664	1,91554	6
	T5 (220C, 16 MIN)	25,4378	2,18703	6
	T6 (220C, 20 MIN)	25,7146	1,76127	6
h	TESTEMUNHA	70,1789	0,68592	6
	T1 (190C, 12 MIN)	68,6446	1,04951	6
	T2 (190C, 16 MIN)	67,4762	1,50727	6
	T3 (190C, 20 MIN)	67,2489	0,91768	6
	T4 (220C, 12 MIN)	64,5645	1,39834	6
	T5 (220C, 16 MIN)	63,1395	1,33828	6
	T6 (220C, 20 MIN)	63,6232	1,66438	6

CONTINUA

TABELA 3 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
ΔE^*	TESTEMUNHA	-	-	-
	T1 (190C, 12 MIN)	2,913	1,637	6
	T2 (190C, 16 MIN)	3,470	1,615	6
	T3 (190C, 20 MIN)	7,120	3,662	6
	T4 (220C, 12 MIN)	12,291	3,485	6
	T5 (220C, 16 MIN)	15,028	2,603	6
	T6 (220C, 20 MIN)	14,421	4,842	6
ΔC^*	TESTEMUNHA	-	-	-
	T1 (190C, 12 MIN)	1,415	0,783	6
	T2 (190C, 16 MIN)	2,056	0,789	6
	T3 (190C, 20 MIN)	2,271	1,201	6
	T4 (220C, 12 MIN)	5,073	1,855	6
	T5 (220C, 16 MIN)	6,550	1,798	6
	T6 (220C, 20 MIN)	5,600	1,623	6

TABELA 4 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES QUÍMICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
Glicose	TESTEMUNHA	37,9912	0,07098	4
	T1 (190C, 12 MIN)	38,3797	0,17443	4
	T2 (190C, 16 MIN)	38,2691	0,37075	4
	T3 (190C, 20 MIN)	38,0810	0,21654	4
	T4 (220C, 12 MIN)	38,3925	0,25931	4
	T5 (220C, 16 MIN)	39,4530	0,47285	4
	T6 (220C, 20 MIN)	39,9033	0,09986	4
Xilose	TESTEMUNHA	4,9299	0,14433	4
	T1 (190C, 12 MIN)	5,0323	0,05469	4
	T2 (190C, 16 MIN)	5,0503	0,15081	4
	T3 (190C, 20 MIN)	4,7019	0,29156	4
	T4 (220C, 12 MIN)	4,5578	0,25843	4
	T5 (220C, 16 MIN)	4,5338	0,12298	4
	T6 (220C, 20 MIN)	4,6173	0,36499	4
Galactose	TESTEMUNHA	1,4142	0,16309	4
	T1 (190C, 12 MIN)	0,9349	0,06243	4
	T2 (190C, 16 MIN)	0,7662	0,21562	4
	T3 (190C, 20 MIN)	0,8766	0,12341	4
	T4 (220C, 12 MIN)	0,6422	0,22490	4
	T5 (220C, 16 MIN)	0,0000	0,00000	4
	T6 (220C, 20 MIN)	0,0000	0,00000	4
Arabinose	TESTEMUNHA	1,3216	0,18765	4
	T1 (190C, 12 MIN)	0,8544	0,12319	4
	T2 (190C, 16 MIN)	0,7303	0,31860	4
	T3 (190C, 20 MIN)	0,9156	0,21474	4
	T4 (220C, 12 MIN)	0,8695	0,28900	4
	T5 (220C, 16 MIN)	0,4933	0,18552	4
	T6 (220C, 20 MIN)	0,3759	0,15628	4
Manose	TESTEMUNHA	9,4200	0,39533	4
	T1 (190C, 12 MIN)	8,9525	0,35443	4
	T2 (190C, 16 MIN)	8,2810	0,67425	4
	T3 (190C, 20 MIN)	8,8518	0,36641	4
	T4 (220C, 12 MIN)	8,8952	0,57121	4
	T5 (220C, 16 MIN)	8,3921	0,63532	4
	T6 (220C, 20 MIN)	8,0668	0,07713	4
Hemicelulose Total	TESTEMUNHA	17,0856	0,82995	4
	T1 (190C, 12 MIN)	15,7741	0,54547	4
	T2 (190C, 16 MIN)	14,8278	1,33721	4
	T3 (190C, 20 MIN)	15,3459	0,95831	4
	T4 (220C, 12 MIN)	14,9647	1,29368	4
	T5 (220C, 16 MIN)	13,4192	0,93017	4
	T6 (220C, 20 MIN)	13,0599	0,48764	4

CONTINUA

TABELA 4 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES QUÍMICAS.

PROPRIEDADE	TRATAMENTO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	REPETIÇÕES
Lignina	TESTEMUNHA	32,6194	0,09971	4
	T1 (190C, 12 MIN)	32,0273	0,60217	4
	T2 (190C, 16 MIN)	32,1885	0,02991	4
	T3 (190C, 20 MIN)	34,6401	2,33532	4
	T4 (220C, 12 MIN)	32,2984	0,04844	4
	T5 (220C, 16 MIN)	32,5203	0,10542	4
	T6 (220C, 20 MIN)	32,7160	0,32622	4
Lignina Solúvel	TESTEMUNHA	0,5946	0,02442	4
	T1 (190C, 12 MIN)	0,5424	0,01178	4
	T2 (190C, 16 MIN)	0,5497	0,04994	4
	T3 (190C, 20 MIN)	0,5446	0,00260	4
	T4 (220C, 12 MIN)	0,5121	0,03493	4
	T5 (220C, 16 MIN)	0,5012	0,04336	4
	T6 (220C, 20 MIN)	0,4593	0,04407	4

**ANEXO 2 – COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS PAINÉIS TRATADOS
COM AS PROPRIEDADES DA TESTEMUNHA.**

TABELA 5 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS RECEBIDOS.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	MEINI	0,001	5	0,00	0,12	0,985
	TUINIC	0,91	5	0,18	1,46	0,230
Erro	MEINI	0,04	30	0,00		
	TUINIC	3,74	30	0,12		
Total	MEINI	14,98	35			
	TUINIC	3014,98	35			

TABELA 6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS PAINÉIS.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	IE2H	123,43	6	20,57	25,17	0,000
	ABS2H	488,69	6	81,44	6,92	0,000
	IE24H	339,43	6	56,57	56,17	0,000
	ABS24H	1409,56	6	234,93	6,57	0,000
	TUE	65,40	6	10,90	32,02	0,000
	TNRE	243,89	6	40,64	12,56	0,000
Erro	IE2H	28,78	35	0,822		
	ABS2H	411,75	35	11,764		
	IE24H	35,25	35	1,00		
	ABS24H	1252,13	35	35,77		
	TUE	11,91	35	0,10		
	TNRE	356,12	35	10,17		
Total	IE2H	1626,07	42			
	ABS2H	10401,34	42			
	IE24H	8265,56	42			
	ABS24H	74988,34	42			
	TUE	3531,61	42			
	TNRE	9512,89	42			

TABELA 7 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DOS PAINÉIS.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	MOR//	258,28	6	43,04	2,95	0,019
	MOE//	3310065,1	6	551677,2	1,24	0,308
	FM//	22445,68	6	37407,91	2,61	0,034
	MOR⊥	89,73	6	14,95	3,22	0,013
	MOE⊥	177020,79	6	29506,4	0,52	0,788
	FM⊥	74548,55	6	12424,78	1,62	0,170
	MOED// ₁	264784,18	6	44130,69	0,57	0,751
	MOED⊥ ₁	351484,36	6	58580,72	0,25	0,955
	MOED// ₃	848636,18	6	141439,3	1,41	0,237
	MOED⊥ ₃	186794,36	6	31132,39	0,13	0,991
Erro	MOR//	509,86	35	14,56		
	MOE//	15517587	35	443359,6		
	FM//	501713,84	35	14334,68		
	MOR⊥	162,31	35	4,63		
	MOE⊥	1978391,5	35	56525,47		
	FM⊥	267676,44	35	7647,90		
	MOED// ₁	2707400,3	35	77354,29		
	MOED⊥ ₁	8130237,9	35	232292,5		
	MOED// ₃	3503654,9	35	100104,4		
	MOED⊥ ₃	7978732,0	35	227963,7		
Total	MOR//	39206,42	42			
	MOE//	126048088	42			
	FM//	31948682	42			
	MOR⊥	18636,78	42			
	MOE⊥	283934035	42			
	FM⊥	15361919	42			
	MOED// ₁	2972184,5	42			
	MOED⊥ ₁	8481722,1	42			
	MOED// ₃	4352291,1	42			
	MOED⊥ ₃	8165526,4	42			

TABELA 8 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES DE COMPRESSÃO E LIGAÇÃO INTERNA.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	COMP//	48,07	6	8,01	1,13	0,365
	MOECOMP//	13042719	6	2173786	0,95	0,471
	COMP⊥	46,37	6	7,73	0,705	0,648
	MOECOMP⊥	17526824	6	2921137	0,542	0,773
	LI	6076,77	6	1013,29	0,262	0,951
Erro	COMP//	247,89	35	7,08		
	MOECOMP//	79858135	35	2281660		
	COMP⊥	383,90	35	10,96		
	MOECOMP⊥	188704655	35	5391561		
	LI	135564,58	35	3873,27		
Total	COMP//	11443,19	42			
	MOECOMP//	549342542	42			
	COMP⊥	11396,67	42			
	MOECOMP⊥	554834405	42			
	LI	12559005	42			

TABELA 9 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	L	946,52	6	157,75	25,15	0,000
	a*	9,32	6	1,55	4,59	0,002
	b*	31,81	6	51,80	23,10	0,000
	C	258,56	6	43,19	19,69	0,000
	h	257,44	6	42,90	26,81	0,000
Erro	L	219,53	35	6,23		
	a*	11,84	35	0,33		
	b*	78,47	35	2,24		
	C	76,58	35	2,18		
	h	56,01	35	1,60		
Total	L	120346,66	42			
	a*	5546,25	42			
	b*	30116,75	42			
	C	35684,84	42			
	h	185550,19	42			

TABELA 10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS VARIÁVEIS DE ALTERAÇÃO COLORIMÉTRICA DOS PAINÉIS TRATADOS.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	ΔE^*	884,84	5	176,97	17,38	0,000
	ΔC^*	140,89	5	28,18	14,10	0,000
Erro	ΔE^*	305,39	30	10,18		
	ΔC^*	59,92	30	1,99		
Total	ΔE^*	4242,25	35			
	ΔC^*	728,28	35			

TABELA 11 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES QUÍMICAS.

FONTE DE VARIAÇÃO	COMPONENTE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	Glicose	13,03	6	2,17	29,19	0,000
	Xilose	1,20	6	0,20	4,05	0,007
	Galactose	6,29	6	1,04	51,44	0,000
	Arabinose	2,28	6	0,38	7,83	0,000
	Manose	5,25	6	0,87	3,81	0,010
	Hemicelulose	45,29	6	7,54	8,16	0,000
	Lignina	18,70	6	3,11	3,67	0,012
	Lignina Sol.	0,04	6	0,00	6,24	0,000
Erro	Glicose	1,56	21	0,07		
	Xilose	1,04	21	0,05		
	Galactose	0,42	21	0,02		
	Arabinose	1,02	21	0,04		
	Manose	4,82	21	0,23		
	Hemicelulose	19,40	21	0,92		
	Lignina	17,84	21	0,85		
	Lignina Sol.	0,02	21	0,00		
Total	Glicose	41816,81	28			
	Xilose	640,59	28			
	Galactose	18,99	28			
	Arabinose	20,97	28			
	Manose	2126,57	28			
	Hemicelulose	6302,11	28			
	Lignina	30005,39	28			
	Lignina Sol.	7,90	28			

**ANEXO 3 - ANÁLISE FATORIAL DO EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO
SOBRE AS PROPRIEDADES DOS PAINÉIS TRATADOS**

TABELA 12 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS PAINÉIS.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Temperatura	IE2H	53,50	1	53,50	68,38	0,000
(Te)	ABS2H	227,24	1	227,24	21,40	0,000
	IE24H	134,21	1	134,21	198,75	0,000
	ABS24H	685,17	1	685,17	19,66	0,000
	TUE	17,29	1	17,29	4,67	0,000
Tempo	IE2H	3,46	2	1,73	2,21	0,127
(Tp)	ABS2H	5,06	2	2,53	0,23	0,789
	IE24H	23,61	2	11,80	17,48	0,000
	ABS24H	13,94	2	6,97	0,20	0,820
	TUE	9,53	2	4,76	12,03	0,000
Te x Tp	IE2H	4,16	2	2,08	2,66	0,086
	ABS2H	137,14	2	68,57	6,46	0,005
	IE24H	11,03	2	5,52	8,17	0,001
	ABS24H	341,67	2	170,83	4,90	0,014
	TUE	1,32	2	0,66	1,67	0,204
Erro	IE2H	23,47	30	0,78		
	ABS2H	318,44	30	10,61		
	IE24H	20,25	30	0,67		
	ABS24H	1045,18	30	38,84		
	TUE	11,80	30	0,39		
Total	IE2H	1144,73	36			
	ABS2H	8103,65	36			
	IE24H	6165,18	36			
	ABS24H	60518,48	36			
	TUE	1602,49	36			

TABELA 13 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO NAS DE PERDA DE MASSA E MASSA ESPECÍFICA.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Temperatura	ME _{TRAT}	0,00	1	0,00	1,49	0,231
(Te)	PMAT	13,32	1	13,32	106,54	0,000
	PDMAT	20,97	1	20,97	175,47	0,000
Tempo	ME _{TRAT}	0,00	2	0,00	0,73	0,491
(Tp)	PMAT	6,039	2	3,02	24,15	0,000
	PDMAT	5,996	2	2,99	25,08	0,000
Te x Tp	ME _{TRAT}	0,00	2	0,00	0,05	0,949
	PMAT	0,16	2	0,08	0,65	0,527
	PDMAT	1,39	2	0,70	5,84	0,007
Erro	ME _{TRAT}	0,02	30	0,00		
	PMAT	3,75	30	0,12		
	PDMAT	3,58	30	0,12		
Total	ME _{TRAT}	14,27	36			
	PMAT	3790,12	36			
	PDMAT	240,56	36			

TABELA 14 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Temperatura (Te)	MOR//	91,05	1	91,05	6,19	0,019
	MOE//	199196,94	1	199196,94	0,39	0,534
	FM//	110924,30	1	110924,30	7,72	0,009
	MOR⊥	49,32	1	49,32	9,93	0,004
	MOE⊥	5267,54	1	5267,54	0,13	0,712
	FM⊥	46061,74	1	46061,74	5,70	0,023
Tempo (Tp)	MOR//	31,78	2	15,88	1,08	0,352
	MOE//	886225,56	2	443112,7	0,88	0,426
	FM//	23911,15	2	11955,79	0,83	0,445
	MOR⊥	30,15	2	15,07	3,03	0,063
	MOE⊥	32060,08	2	16030,04	0,42	0,659
	FM⊥	23261,62	2	11630,81	1,44	0,253
Te x Tp	MOR//	39,75	2	19,876	1,35	0,274
	MOE//	1210282,2	2	605141,1	1,20	0,315
	FM//	20930,24	2	10466,12	0,72	0,491
	MOR⊥	6,68	2	3,34	0,67	0,518
	MOE⊥	35812,79	2	17906,39	0,47	0,628
	FM⊥	4112,63	2	2056,31	0,25	0,777
Erro	MOR//	440,97	30	14,69		
	MOE//	15121247	30	504041,6		
	FM//	431050,78	30	14388,36		
	MOR⊥	148,90	30	4,96		
	MOE⊥	1138738,0	30	37957,9		
	FM⊥	242382,69	30	8079,42		
Total	MOR//	32221,83	36			
	MOE//	105699879	36			
	FM//	26333111	36			
	MOR⊥	15814,71	36			
	MOE⊥	246537669	36			
	FM⊥	13099532	36			

TABELA 15 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Temperatura	MOED// ₁	9.292.154	1	9.292.154	1,08	0,306
(Te)	MOED⊥ ₁	123.527	1	123.527	0,00	0,945
	MOED// ₃	15.239.794	1	15.239.794	1,34	0,256
	MOED⊥ ₃	335.030	1	335.030	0,01	0,908
Tempo	MOED// ₁	2.470.718	2	1.235.359	0,14	0,866
(Tp)	MOED⊥ ₁	17.969.759	2	8.984.879	0,36	0,704
	MOED// ₃	28.996.283	2	14.498.142	1,27	0,294
	MOED⊥ ₃	6.444.843	2	3.222.422	0,13	0,878
Te x Tp	MOED// ₁	8.325.283	2	4.162.641	0,49	0,620
	MOED⊥ ₁	15.877.142	2	7.938.571	0,31	0,733
	MOED// ₃	38.255.987	2	19.127.993	1,68	0,203
	MOED⊥ ₃	4.110.766	2	2.055.383	0,08	0,920
Erro	MOED// ₁	257.216.444	30	8.573.881		
	MOED⊥ ₁	757.602.646	30	25.253.422		
	MOED// ₃	341.363.360	30	11.378.779		
	MOED⊥ ₃	741.591.767	30	24.719.726		
Total	MOED// ₁	91.751.765.031	36			
	MOED⊥ ₁	67.834.906.136	36			
	MOED// ₃	92.103.429.176	36			
	MOED⊥ ₃	69.440.701.154	36			

TABELA 16 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS E DE ALTERAÇÃO DE COR.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Temperatura (Te)	L	650,76	1	650,76	94,45	0,000
	a*	0,45	1	0,45	1,28	0,267
	b*	247,27	1	247,27	101,25	0,000
	C	214,23	1	214,23	90,69	0,000
	h	145,04	1	145,04	81,11	0,000
	ΔE^*	797,40	1	797,40	78,33	0,000
	ΔC^*	131,79	1	131,79	68,97	0,000
Tempo (Tp)	L	51,88	2	25,94	3,76	0,035
	a*	0,08	2	0,04	0,12	0,881
	b*	11,64	2	5,82	2,38	0,109
	C	9,06	2	4,53	1,91	0,164
	h	12,23	2	6,11	3,42	0,046
	ΔE^*	60,26	2	30,13	2,96	0,067
	ΔC^*	6,94	2	3,47	0,19	0,193
Te x Tp	L	6,644	2	3,32	0,48	0,622
	a*	2,01	2	1,00	2,85	0,073
	b*	5,98	2	2,99	1,22	0,308
	C	7,44	2	3,72	1,57	0,224
	h	0,78	2	0,39	0,21	0,805
	ΔE^*	27,18	2	13,59	1,33	0,278
	ΔC^*	2,16	2	1,08	0,54	0,587
Erro	L	206,68	30	6,88		
	a*	10,57	30	0,35		
	b*	73,26	30	2,44		
	C	70,90	30	2,36		
	h	53,64	30	1,78		
	ΔE^*	305,39	30	10,18		
	ΔC^*	59,92	30	1,99		
Total	L	99380,13	36			
	a*	4884,93	36			
	b*	25007,57	36			
	C	29910,87	36			
	h	155994,53	36			
	ΔE^*	4242,25	36			
	ΔC^*	728,28	36			

TABELA 17 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS.

FONTE DE VARIAÇÃO	COMPONENTE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Temperatura (Te)	Glicose	6,07	1	6,07	70,71	0,000
	Xilose	0,77	1	0,77	14,20	0,001
	Galactose	2,49	1	2,49	128,96	0,000
	Arabinose	0,38	1	0,38	7,60	0,013
	Manose	0,35	1	0,35	1,47	0,240
	Hemicelulose	13,52	1	13,52	14,03	0,001
	Lignina	1,16	1	1,16	1,17	0,292
	Lignina Sol.	0,02	1	0,02	14,03	0,001
Tempo (Tp)	Glicose	1,67	2	0,81	9,46	0,002
	Xilose	0,09	2	0,04	0,88	0,431
	Galactose	0,77	2	0,38	19,97	0,000
	Arabinose	0,29	2	0,14	2,89	0,081
	Manose	1,53	2	0,76	3,17	0,066
	Hemicelulose	7,78	2	3,89	4,04	0,036
	Lignina	10,89	2	5,44	5,50	0,014
	Lignina Sol.	0,00	2	0,00	1,24	0,311
Te x Tp	Glicose	3,36	2	1,68	19,60	0,000
	Xilose	0,22	2	0,11	2,08	0,153
	Galactose	0,38	2	0,19	9,93	0,001
	Arabinose	0,30	2	0,15	3,03	0,073
	Manose	0,91	2	0,45	1,87	0,182
	Hemicelulose	2,21	2	1,10	1,14	0,340
	Lignina	6,61	2	3,30	3,33	0,058
	Lignina Sol.	0,00	2	0,00	1,22	0,317
Erro	Glicose	1,54	18	0,08		
	Xilose	0,98	18	0,05		
	Galactose	0,35	18	0,02		
	Arabinose	0,91	18	0,05		
	Manose	4,35	18	0,24		
	Hemicelulose	17,34	18	0,96		
	Lignina	17,81	18	0,99		
	Lignina Sol.	0,02	18	0,00		
Total	Glicose	36043,47	24			
	Xilose	543,31	24			
	Galactose	10,91	24			
	Arabinose	13,88	24			
	Manose	1771,15	24			
	Hemicelulose	5132,38	24			
	Lignina	25749,28	24			
	Lignina Sol.	6,49	24			

**ANEXO 4 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE
DIMENSIONAL ENTRE OS PAINÉIS OSB E O COMPENSADO.**

TABELA 18 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS PROPRIEDADES DE ESTABILIDADE DIMENSIONAL DOS PAINÉIS TRATADOS, DA TESTEMUNHA E DO COMPENSADO.

FONTE DE VARIAÇÃO	PROPRIEDADE	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F CALC	SIGNIFICÂNCIA
Tratamento	IE2H	123,49	6	20,57	25,01	0,000
	ABS2H	488,70	6	81,44	6,93	0,000
	IE24H	339,43	6	56,57	56,17	0,000
	ABS24H	1409,56	6	234,92	6,57	0,000
	TUE	65,40	6	10,90	32,02	0,000
Erro	IE2H	28,78	35	0,82		
	ABS2H	411,75	35	11,76		
	IE24H	35,25	35	1,00		
	ABS24H	1252,14	35	35,77		
	TUE	11,92	35	0,34		
Total	IE2H	1626,08	42			
	ABS2H	10401,35	42			
	IE24H	8265,56	42			
	ABS24H	74988,34	42			
	TUE	2119,12	42			